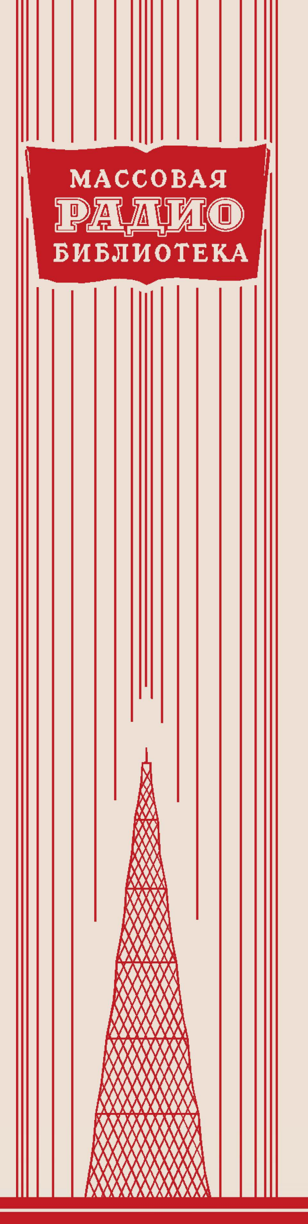


Г. И. БЯЛИК

ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ



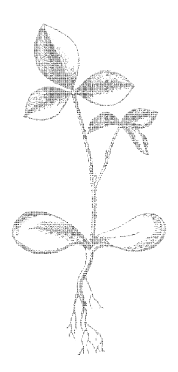
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 358

Г. И. БЯЛИК

ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

В книге, рассчитанной на радиолюбителей, знакомых с основами телевизионной техники, излагаются физические основы цветного телевидения и принципы построения современных систем цветного телевидения.

Бялик Гавриил Иосифович

ЦВЕТНОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Редактор *В. Ф. Самойлов* Техн. редактор *П. М. Асанов*

Сдано в набор 16/IX 1959 г. Подписано к печати 22/XII 1959 г.
Т-14507 Бумага 84×108[1]/32 6,56 печ. л.+4 цветных вклейки Уч.-изд. л. 7,4
Тираж 74 500 экз. Цена 3 р. 50 к. Заказ 487.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Цветоощущение является примером высшей приспособленности наших органов чувств к восприятию внешнего мира.

Зрительный образ окружающих предметов может быть бесцветным (черно-белым) или одноцветным, как это имеет место при сумеречном зрении, при рассматривании черно-белых либо окрашенных одним тоном фотографических, кино- или телевизионных изображений.

В указанных случаях о рассматриваемом предмете мы судим по количественному изменению света, отражаемого различными точками поверхности предмета. Например, при рассматривании фотографии лица каждый малый участок поверхности отражает разное количество падающего света (от лба, например, отражается больше света, чем от волос). Наибольшее отражение происходит от участков, соответствующих зубам и белкам глаз. Незначительные изменения количества отраженного света соответствуют морщинам кожи и т. д.

Здесь в этих случаях спектральный состав света, отраженного от различных мест изображения, одинаков, но и без цветов, только по распределению светотени (полутонов) наблюдатель составляет в общем верное представление о рассматриваемом предмете.

Однако с помощью зрения мы разбираемся также в качественном составе лучистой энергии, попадающей в глаз, и это проявляется как ощущение цвета.

Цветоощущение доставляет человеку громадное эстетическое наслаждение. Способность различать цвета позволяет человеку значительно лучше ориентироваться в окружающем, лучше познавать природу. Цвет, помимо выявления скрытых в черно-белом изображении деталей, подчеркивает определенность контуров и переходов. Плоское изо-

бражение при наличии цвета ощущается в определенной мере объемным.

Вот почему на протяжении почти всей истории телевидения ученые и инженеры стремились дополнить телевизионное изображение отсутствовавшей в нем важнейшей качественной характеристики объектов — цветом.

Еще в 1925 г. советским инженером И. А. Адамианом был предложен проект цветной телевизионной системы. В этой системе анализ и синтез цветного изображения осуществлялся диском с точечными отверстиями, аналогичным известному диску Нипкова.

В отличие от диска Нипкова в диске Адамиана на периферии по отрезкам спиралей располагались последовательно три серии отверстий на одинаковых угловых расстояниях друг от друга. Каждая серия отверстий при вращении диска осуществляла развертку всего кадра. Отверстия каждой из трех серий были прикрыты цветными фильтрами: отверстия первой серии — красным фильтром, второй серии — синим фильтром, третьей серии — зеленым фильтром. Один диск устанавливался на передающем конце системы — между объектом и фотоэлементом, другой такой же диск — в приемнике между источником света и наблюдателем. Диски вращались синхронно и синфазно. Яркость источника света управлялась усиленным током фотоэлемента.

Таким образом осуществлялось последовательное разложение цветного изображения на три одноцветных и аналогичный последовательный синтез трех одноцветных изображений в цветное.

В эти же годы подобные идеи разрабатывались за рубежом. Так, в 1928 г. англичанин Бэрд демонстрировал действующую цветную телевизионную систему. В системе Бэрда, как и в предложении Адамиана, развертка осуществлялась последовательно дисками с отверстиями, прикрытыми цветными фильтрами.

В 1929 г. в нью-йоркской лаборатории компании Белл демонстрировалась система цветного телевидения, в которой с помощью трех раздельных одноцветных трактов телевидения одновременно осуществлялся трехцветный анализ изображения, передача к приемникам и одновременный оптический синтез трех одноцветных изображений в цветное.

Упомянутые две принципиально отличающиеся друг от друга по способу воспроизведения цветов системы цветного

телевидения на протяжении последующих лет изменялись и усовершенствовались, доводились до практической осуществимости, и мы к ним в дальнейшем вернемся.

Хотя способы передачи изображения в цветах предлагались давно, они не могли быть реализованы до последнего времени по ряду причин и прежде всего потому, что уровень техники черно-белого телевидения был недостаточно высок.

В последние годы цветное телевидение развивалось в лабораториях параллельно с широким развитием черно-белого телевидения, с использованием основных достижений этой сравнительно более простой отрасли телевизионной техники. Методы и техника цветного телевидения доведены в настоящее время до состояния возможности их практического внедрения.

Вместе с тем при внедрении цветного телевидения следует считаться с тем фактом, что в действии находятся уже тысячи телевизионных станций и десятки миллионов зрителей пользуются черно-белыми телевизорами. Этот факт приводит к необходимости удовлетворения существенного требования *совместимости* внедряемого цветного телевидения с действующим черно-белым. Что же понимается под совместимостью?

Ясно, что телевизионные приемники, рационально сконструированные для приема черно-белых передач, не смогут без специального изменения в схеме и конструкции выполнять новые дополнительные функции воспроизведения еще и цветности. Выполнение дополнительных функций требует применения новых добавочных технических средств.

Трудно предположить, что массовое внедрение цветного телевидения приведет к полному отказу от черно-белых передач. Нельзя также допустить, чтобы при внедрении цветного телевидения миллионы зрителей оказались бы владельцами бездействующих приемников черно-белого телевидения. Внедрение цветного телевидения, очевидно, будет осуществляться постепенно, путем параллельной работы цветных и черно-белых передающих станций.

В этих условиях и в дальнейшем разумно требовать, чтобы имеющиеся приемники принимали бы не только программы станций черно-белого телевидения, но и программы станций цветного телевидения в черно-белом варианте, т. е. выполняли бы свои обычные функции. В этом

смысле и понимается совместимость систем черно-белого и цветного телевидения.

Удовлетворение требования совместимости предполагает возможность использования многих технических средств черно-белого телевидения при замене его цветным. Важно подчеркнуть, что ширина полосы частот, требующейся для передачи как черно-белого, так и цветного телевидения, должна быть одинакова, что позволит использовать на станциях цветного телевидения наиболее дорогостоящие и сложные устройства станций черно-белого телевидения.

Так, например, линии междугородной телевизионной связи, требующие больших капиталовложений, построены и строятся в соответствии с параметрами черно-белого телевизионного вещания. Весьма важной является возможность передачи цветных телевизионных программ по этим линиям.

С другой стороны совместимость предполагает также возможность приема черно-белых передач на цветной телевизор без каких-либо его переделок.

Стремление удовлетворить требование совместимости задержало несколько лабораторную разработку рациональной системы, но в то же время совместимую систему легче практически осуществить и внедрить.

В ближайшее время, как это предписывается контрольными цифрами XXI съезда КПСС по развитию народного хозяйства в 1959—1965 гг., в Советском Союзе начнется внедрение цветного телевидения.

Глава первая

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О ЦВЕТАХ

1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ И ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА

Поток лучистой энергии — электромагнитных колебаний, длины волн которых находятся в пределах ~400—700 *ммк*[1], попадая в глаз, вызывают ощущение света. Механизм светоощущения заключается в том, что лучистая энергия, воздействуя на разветвленную систему нервных окончаний, находящуюся в глубине глазного яблока и называемую сетчатой оболочкой, вызывает физико-химическую окислительную реакцию. Последняя раздражает окончания нервных волокон; эти раздражения передаются к зрительным центрам головного мозга и ощущаются как свет. Чем больше поток лучистой энергии, тем сильнее раздражение и тем ярче кажется нам источник света.

Однако ощущения, вызываемые различными источниками, даже при их одинаковой субъективной яркости, могут быть различными. Если, например, длина волн света, воздействующих на глаз, близка к 700 *ммк*, то ощущаемый свет кажется красным; колебания с длинами волн в 580 *ммк* ощущаются желтыми, 430 *ммк* — синими и т. д. Определенным участкам длин волн видимого света соответствуют различные цвета.

Это не означает, однако, что небольшое изменение длины волны будет ощущаться в виде изменения цвета; энергия с длиной волны 435 *ммк*, как и с длиной волны 432 *ммк*, ощущается одинаковыми оттенками синего цвета. Существует определенное пороговое изменение длины волны, ощущаемое глазом как некоторое изменение цвета.

Лучистая энергия, переносимая колебанием с какой-нибудь одной определенной длиной волны, называется

[1] *ммк* — миллимикрон, равный 10^{-7} *см*.

монохроматическим излучением; с такими излучениями в природе мы встречаемся редко. Распространенные источники света — солнце, звезды, лампы — не являются монохроматическими излучателями, они излучают одновременно колебания с различными длинами волн. В этом нетрудно убедиться, если повторить известный школьный опыт — разложить белый солнечный свет с помощью оптической призмы. В спектре солнечного света цвета изменяются непрерывно от красного к фиолетовому. Если в непрозрачном экране, на котором наблюдается спектр, вырезать очень узкую полоску, то проходящий через эту полоску одноцветный пучок близок к монохроматическому излучению.

Совокупность монохроматических излучений обладает обратимостью, — собрав с помощью линзы все полученные при разложении белого света отдельные цветовые лучи в один смешанный луч, мы снова получим луч белого света.

Свет, излучаемый солнцем, лампами и другими тепловыми источниками, состоит из большого числа лучей с различной длиной волны, обладающих при зрительном восприятии различной цветностью.

Излучения, создаваемые тепловыми источниками (накаленными жидкими иил твердыми телами), имеют непрерывный спектр, в их спектрах можно обнаружить монохроматические лучи с любой длиной волны. Однако цветность источника сложного излучения зависит от энергетического соотношения различных монохроматических лучей. Так, например, в свете горящей свечи больше оранжево-красных лучей. В телах, которые накаливаются до большей температуры, преобладают сине-фиолетовые лучи.

Для того чтобы характеризовать источник излучения, нужно указать, в каком количественном соотношении находятся различные монохроматические лучи. Подобная характеристика некоторого источника, выраженная графически, приведена на рис. 1, где изображена кривая зависимости относительной излучаемой мощности от длины волны.

Опыт выясняет интересное свойство зрения, с успехом использующееся в цветном кино и телевидении и заключающееся в том, что любой сложный по спектральному составу источник света может быть по цветности заменен монохроматическим источником таким образом, что видимой разницы в цвете не будет ощущаться вовсе[1].

[1] Исключение составляют пурпурные цвета, заменяющиеся суммой двух монохроматических цветов — красным и синим.

Например, желтое пламя свечи, ощущаемое в результате воздействия на глаз совокупности монохроматических излучений, по цвету сходно с одним из оттенков желтого в солнечном спектре. Или, другой пример, цвет источника, характеризуемого кривой распределения, изображенной на рис. 1, по ощущению близок к монохроматическому излучению с длиной волны 595 *ммк.*

Это один из фундаментальных фактов науки о цвете, и мы к нему еще вернемся. Пока же заметим, что если глаз различает разницу в двух сравниваемых цветах, то эти излучения по спектральному составу различны. Если же глаз не различает два сравниваемых цвета, то это еще не означает, что излучения одинаковы. Возможность подбора монохроматического излучения, субъективно одинакового с цветом сложного излучения, убеждает нас в справедливости высказанного положения.

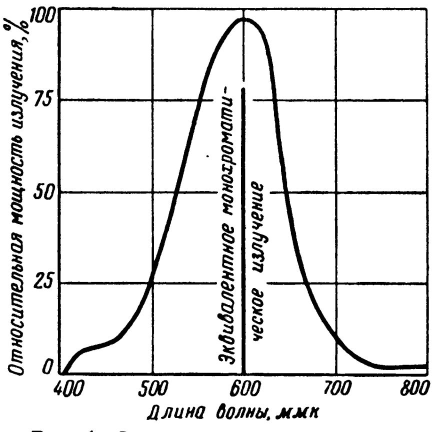


Рис. 1. Спектральная кривая распределения мощности излучения некоторого источника света.

Существует чрезвычайно много сложных излучений, сходных по цвету с одним и тем же монохроматическим излучением, но вместе с тем отличающихся друг от друга. Все эти излучения характеризуются общим цветовым тоном; последний определяется длиной волны сходного монохроматического излучения.

Итак, цветовой тон любого сложного излучения может быть описан цветом сходного монохроматического излучения (или для определенной области цветов одним из пурпурных цветов, являющихся в свою очередь суммой монохроматических красного и синего излучений). Однако сходство двух рассматриваемых цветов будет точным только в том случае, если монохроматическое излучение как бы разбавлено белым цветом, т. е. менее н а с ы щ е н о.

Реальные предметы, как правило, обладают цветом менее насыщенным, чем цвета спектральные. Красный цвет спектра более «чистый», чем красно-розовый цвет мака.

Понятно, что причиной субъективного отличия является наличие в спектре отражения мака многих колебаний. Однако, каков бы ни был спектр распределения отраженной энергии, любая цветность реального предмета может быть субъективно точно воссоздана совокупностью монохроматического излучения и излучения белого цвета. Чем относительно больше белого в смеси, тем менее насыщен результирующий цвет, и наоборот.

Насыщенность, или чистоту тона, можно оценивать как отношение яркости монохроматического излучения к сумме яркостей этого излучения и разбавляющего его белого цвета и выражать в процентах. Насыщенность спектральных цветов равна 100%, а насыщенноть белого — нулю.

Большинство наблюдаемых нами предметов не являются самостоятельными излучателями световых волн — они лишь отражают падающий на них свет.

Окраска несамосветящихся предметов (вторичных излучателей) зависит как от спектрального состава освещающих их источников, так и от свойств предмета. Васильки, например, из всей совокупности падающих на них солнечных лучей наиболее интенсивно отражают сине-голубые лучи и поглощают желто-красные. При освещении васильков красными лучами они покажутся нам черными (или темно-красными, ибо небольшая часть лучей все же отразится).

Хотя васильки в солнечном свете кажутся нам синими, а маки красными, они не отражают вóлны только одной длины. От окрашенных предметов отражается также совокупность колебаний с разными длинами волн. Окрашенные предметы лишь перераспределяют энергию спектра падающего на них света в соответствии с зависимостью коэффициента отражения от длины волны.

На рис. 2,*а* изображена кривая зависимости относительной излучаемой мощности от длины волны для некоторого источника света. Если свет этого источника падает на предмет, поверхность которого отражает различные монохроматические лучи, например в соответствии с кривой, изображенной на рис. 2,*б*, то распределение относительной мощности в результирующем отраженном световом потоке изобразится кривой на рис. 2,*в*. Эта кривая получена путем перемножения соответствующих ординат кривых *а* и *б*.

Источник, характеризуемый кривой на рис. 2,*а*, эквивалентен по ощущению монохроматическому излучению

с длиной волны 610 *ммк*, тогда как свет, отраженный от рассмотренного предмета, ощущается как монохроматическое излучение с длиной волны 540 *ммк*. Человеческое ли-

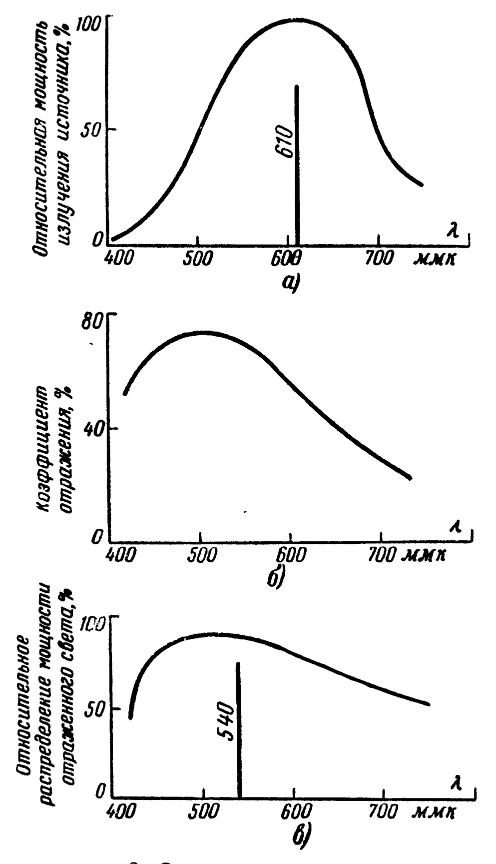


Рис. 2. Спектральные кривые.

а — распределения мощности излучения некоторого источника света; *б* — коэффициента отражения некоторого предмета; *в* — распределения мощности в результирующем отраженном световом потоке.

цо, рассматриваемое в свете некоторых газосветных источников, кажется нам неестественно и неприятно окрашенным.

Помимо окрашенных предметов, практически существуют и неокрашенные, так называемые ахроматические предметы, не изменяющие спектральный состав падающих

на них излучений. Бумага, называемая белой, на солнце ощущается белой; при освещении красными лучами — красной и т. д. Та же бумага, равномерно покрытая тонким слоем сажи, остается в солнечном свете белой, но менее интенсивно отражающей свет, и мы называем ее серой. Увеличивая толщину слоя сажи на бумаге, можно пройти через все градации от белого через серое к черному. Таким образом, «серость» ахроматического предмета зависит от величины коэффициента отражения.

Для обобщения цветовых характеристик предметов необходимо еще раз коснуться вопроса о яркости.

Увеличивая интенсивность света, падающего на поверхность любой цветности, мы не вносим перераспределения в спектральный состав отраженных лучей, а изменяем лишь их количество, их светлоту. При этом может измениться субъективное ощущение цвета. Так, например, коричневый цвет по спектральному составу совпадает с желтым, однако отличается от него меньшей светлотой (для вторичных излучателей — малой яркостью поверхности). То же можно сказать о вишневом цвете, являющемся по составу красным.

Таким образом, для того чтобы полностью характеризовать цвет, необходимо определить его цветовой тон и насыщенность (определяющие цветность), а также яркость.

Любой реально существующий цвет может быть совершенно точно воссоздан смесью монохроматического излучения с определенной длиной волны и белого цвета в отношении, определяемом насыщенностью, с определенной яркостью смешиваемых излучений.

2. СМЕЩЕНИЕ ЦВЕТОВ

С помощью графических построений можно очень наглядно систематизировать наши понятия о цвете. Если считать, что сравниваемые цвета обладают постоянной светлотой, то всю совокупность цветностей можно изобразить с помощью круга Ньютона (см. рис. 3 на цветной вклейке).

По окружности располагается непрерывная последовательность насыщенных (монохроматических) спектральных цветов от красного до фиолетового. На меньшей дуге между красным и фиолетовым находятся пурпурные цвета, постепенно изменяющиеся от красного к фиолетовому. В цен-

тре расположен белый цвет. Вдоль любого радиуса происходит постепенное изменение насыщенности данного цвета от 100% насыщенности на периферии к чисто белому цвету в центре.

С помощью такого построения можно проанализировать любую цветность: отыскав в круге точку, цветность которой субъективно сходна со сравниваемой, и проведя через эту точку радиус, находим цветность монохроматического излучения (длину волны) в точке пересечения радиуса с внешней окружностью и отношение количеств монохроматического излучения к белому цвету как отношение отрезков, на которые данная точка делит радиус.

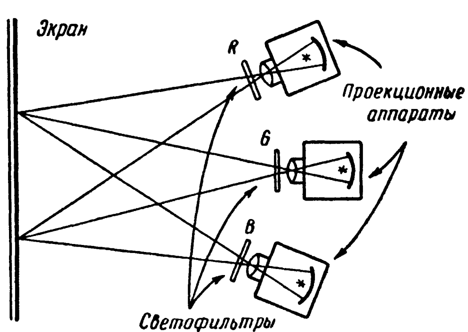


Рис. 4. Установка для слагательного смешения цветов.

Вернемся снова к синтетической способности органа зрения, выражающейся в том, что при совместном действии различных монохроматических излучений сознание ощущает только один цвет, и конкретизируем результаты оптического смешения цветов.

Предположим, что в нашем распоряжении имеются несколько монохроматических источников света с произвольно изменяющейся длиной волны и интенсивностью излучения. Свет от источников отбрасывается на один общий экран, на котором и рассматриваются результаты смешения (рис. 4).

Введем в действие два источника и установим их цветности так, чтобы они располагались на периферии круга Ньютона ближе, чем диаметрально противоположные цветности. Смешивая два таких цвета, мы ощутим новый цвет, цветовой тон которого лежит между смешиваемыми цветами. Так, смешивая красный с желтым, мы ощутим оранжевый; красный с зеленым — желтый; зеленый с фиолетовым — голубой; фиолетовый с красным — пурпурный и т. д. (см. рис. 5,*а* на цветной вклейке).

При смешении цветов, дальше отстоящих друг от друга, приблизительно диаметрально противоположных в круге Ньютона, возникает ощущение б е л о г о цвета. Такими

парами являются: красный и голубовато-зеленый, желтый и синий, зеленый и пурпурный и т. п. Цвета, которые в результате смешения создают ощущение белого цвета, называются **дополнительными**. Существует бесчисленное множество дополнительных цветов.

Каждый из цветов, участвующих в смеси, может быть не монохроматическим излучением, а полученным в свою очередь в результате смешения двух других (или нескольких) излучений. Это обстоятельство не изменит результата смешения. Цвет смеси зависит только от смешанных цветов, но не зависит от их спектрального состава.

Нужно иметь в виду, что расчет результатов смешения может быть окончательно и точно выполнен лишь при учете энергетических соотношений смешиваемых излучений — совокупность монохроматических излучений солнечного спектра, как мы уже говорили, может казаться белой и любого другого цвета, если перераспределить интенсивности отдельных колебаний. Смешивая два монохроматических излучения, например оранжевого и зеленого цвета, мы может получить всю гамму цветов между ними, в зависимости от относительных количеств смешиваемых излучений.

Можно считать, что результат смешения двух цветностей расположен на прямой, соединяющей эти цветности в круге Ньютона. Это означает, что в результате смешения монохроматических излучений, мы получаем менее насыщенный цвет. Чем ближе смешиваемые цветности друг к другу по цветовому тону, тем более насыщенным оказывается результирующий цвет.

Рассмотрим результаты смешения трех монохроматических излучений. Используя попарно два из трех цветов, мы можем убедиться, что результат смешения трех цветов расположен на плоскости, ограниченной **треугольником**, в вершинах которого находятся смешиваемые цвета.

Действительно, в результате смешения цветов R и G (рис. 6) получим излучения, цветности которых расположены на прямой RG, например P_1, P_2, P_3 и т. д. Каждое из этих излучений в смеси с третьим цветом B даст результирующее излучение, цветность которого расположена на прямых RB, P_1B, P_2B, P_3B, GB.

Для того чтобы в результате смешения можно было бы получить и белый цвет, точка белого должна лежать внутри треугольника смешиваемых цветов. Это относится к лю-

бому другому цвету, который желательно получить в результате смешения.

Если точка, соответствующая белому цвету W, находится внутри треугольника, то с помощью трех цветов, называемых **основными**, можно воспроизвести любой цветовой тон, ибо в **любом** направлении найдется точка, лежащая внутри треугольника, через которую можно провести радиус. Так, например, в построении, приведенном на рис. 7,*а*, цветовой тон точки P_1 определяется длиной волны λ_1, точки P_2 — λ_2 и т. д.

Если же точка белого W находится вне треугольника (рис. 7,*б*), то ни белый цвет, ни цветовые тона, соответствующие длинам волн на большей дуге λ_1—λ_2, не могут быть получены путем смешения основных цветов.

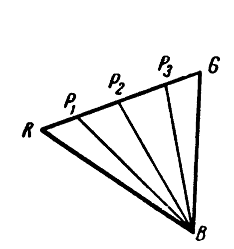
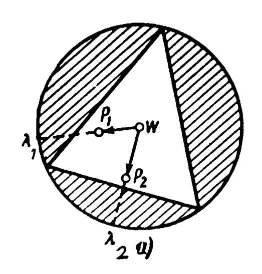


Рис. 6. Треугольник смешения цветов.



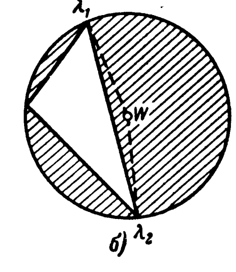


Рис. 7. Графики к вопросу смешения трех цветов.

Для того чтобы в результате смешения можно было получить большее число более насыщенных цветов, основные цвета должны быть близкими к монохроматическим излучениям и расположены на спектральной шкале на равных расстояниях друг от друга; при трех основных цветах в круг Ньютона нужно при этом условии вписать равносторонний треугольник.

Итак, при наличии трех основных цветов путем смешения можно создать все цветовые тона и большое число градаций насыщенности. Использование большего числа основных цветов позволяет получать более насыщенные цвета, однако при этом значительно усложняется техника цветного телевидения. Поэтому в цветном телевидении не применяется более трех основных цветов.

Смешивать цвета можно двумя способами — не только рассмотренным уже **слагательным** или аддитивным, но и **вычитательным** или субтрактивным.

При слагательном смешении результирующий цвет образуется суммарным действием нескольких источников, например в том случае, когда на общий экран отбрасывается несколько пучков света.

При вычитательном смешении результирующий цвет образуется путем перераспределения спектрального состава обычно одного сложного излучения. Подобное перераспределение можно осуществить с помощью светофильтров, красок и т. п. Желтый цвет, например, можно получить, смешивая красные и зеленые лучи, — это пример слагательного смешения. Но тот же желтый цвет может быть получен, если из белого света вычесть синий, поставив на пути лучей желтый светофильтр, интенсивно поглощающий синие лучи.

Принципиальное отличие вычитательного смешения от слагательного заключается в том, что в результате вычитательного смешения данный цвет может быть получен только в том случае, если сложное излучение, спектральный состав которого перераспределяется, содержало до смешения данный цвет.

С процессами вычитательного смешения мы имеем дело в живописи, в цветной полиграфии, в цветном кино. Основными цветами вычитательного смешения являются цвета, полученные от попарного смешения основных цветов, выбранных в слагательной системе смешения (см. рис. 5 на цветной вклейке). В результате попарного смешения на экране красных, зеленых и фиолетовых лучей мы получим желтый, голубой и пурпурный цвета. В соответствующей субтрактивной системе в качестве основных цветов должны быть выбраны следующие краски или светофильтры: пурпурная (белый цвет минус зеленый), желтая (белый цвет минус фиолетовый) и голубая (белый цвет минус красный).

Смешивая на бумаге пурпурную и желтую краски, мы получим в результате красный цвет, как это показано на рис. 5,*б* (см. цветную вклейку).

В цветном телевидении в настоящее время используется слагательное смешение цветов. Последнее может быть получено не только в результате одновременного непрерывного попадания на экран смешиваемых цветов и перекрывания всеми источниками света одной и той же поверхности экрана. Тот же эффект смешения получится, если поверхность экрана освещается последовательно с достаточно большой скоростью теми же источниками, на-

пример сначала красным, затем — зеленым, потом синим и т. д. Если скорость перемен цвета достаточно велика и ощущение от первого источника не успевает исчезнуть за период воздействия второго и третьего источников, то смешение цветов происходит в сознании наблюдателя.

В цветном телевидении используется также пространственное смешение (одновременное и последовательное); в этом случае три мелких смешиваемых цветных элемента (точки или линии) расположены вперемежку на экране, соприкасаясь друг с другом, но не перекрывая друг друга (см. рис. 8 на цветной вклейке). С некоторого расстояния глаз наблюдателя перестает раздельно различать отдельные цветные элементы. Последние смешиваются в сознании наблюдателя и образуют ощущение однородно окрашенных участков с точно таким же цветом, как при одновременном или последовательном перекрывании световыми потоками одной большой поверхности. Результаты пространственного смешения не зависят от того, действуют ли цветовые раздражители одновременно или в быстро переменной последовательности (с тем же пространственным расположением).

3. ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

Как же объяснить с точки зрения физиологии и психологии зрения экспериментальные факты, изложенные выше? Изменение ощущения цвета при изменении длины волны монохроматического излучения могло бы навести на мысль, что глаз является приемником света, реагирующим на длину волны излучения. Но эта концепция не объясняет, а наоборот находится в противоречии с таким фактом, как ощущение одного цвета при воздействии совокупности излучений с разными длинами волн. Как объяснить, например, возникновение ощущения оранжевого цвета, аналогичного действию монохроматического излучения с длиной волны в 600 *ммк*, при одновременном воздействии колебаний с длиной волны 650 *ммк* (красный цвет) и 580 *ммк* (желтый цвет)? Ведь длина волны 600 *ммк* не находится ни в какой численной связи с длинами волн смешиваемых колебаний. Необъяснимой осталась бы также возможность создания любого цветового тона при смешении трех основных цветов.

Общепринятой в настоящее время теорией, подтвержденной экспериментальными исследованиями, является трехкомпонентная теория цветового зрения, выска-

занная М. В. Ломоносовым и подробно разработанная затем Т. Юнгом и Г. Гельмгольцем.

Согласно трехкомпонентной теории цветоощущающий (колбочковый) аппарат глаза содержит нервные окончания трех родов. При раздельном раздражении каждого сорта окончаний возникают соответственно ощущения насыщенных красного, зеленого и синего цветов. Волны различной длины возбуждают эти окончания неодинаково. Так, первый род окончаний преимущественно чувствителен к длинноволновой части спектра (красно-оранжевой), вто-

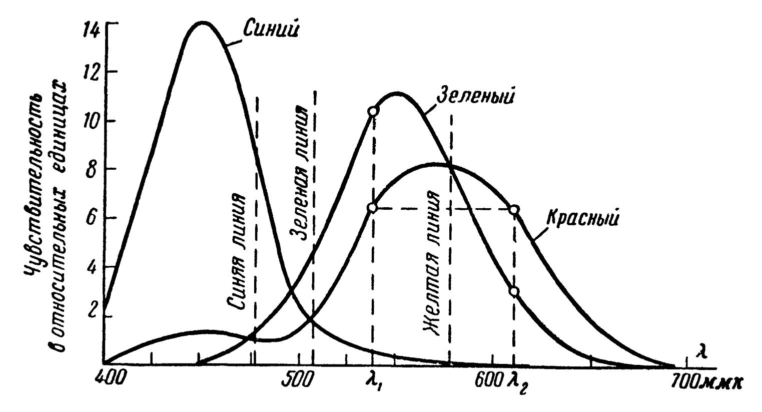


Рис. 9. Спектральные кривые чувствительности цветовых приемников глаза.

рой род — к средневолновой части спектра (зеленой) и третий род — к коротковолновой (сине-фиолетовой) части спектра (рис. 9).

Воспринимаемый глазом свет раздражает три рода окончаний одновременно и совокупность трех различных возбуждений ощущается одним цветом. Зрительный аппарат как бы анализирует воздействующий на него свет, определяя в нем относительное содержание длинноволновых, средневолновых и коротковолновых лучей, а затем осуществляется синтез (в мозгу) трех возбуждений в единый цвет.

Ход кривых возбуждений свидетельствует о том, что при синтезе ощущения не может иметь место неопределенность. Если бы процесс цветоощущения возникал в результате раздражения только одного сорта цветоприемников, то разные по составу излучения могли бы создавать

одинаковые ощущения. Так, например, если предположить, что зависимость раздражения от длины волны изображается только одной кривой, то при некоторых абсциссах λ_1 и λ_2 (рис. 9) ординаты одной из кривых были бы одинаковыми, т. е. излучения с длинами волн λ_1 и λ_2 вызывали бы одинаковое ощущение. При наличии цветоприемников трех сортов такое состояние невозможно. Хотя при длинах волн λ_1 и λ_2 возбуждения окончаний первого рода одинаковы, возбуждения других окончаний значительно отличаются как от первого, так и между собой. Цветоощущающий аппарат, состоящий из трех родов цветоприемников, позволяет глазу весьма тонко различать цвета как по насыщенности, так и по цветовому тону.

В лабораторных условиях глаз способен различить до 150 цветовых градаций в солнечном спектре (т. е. в условиях максимальной насыщенности). К этому нужно добавить еще около 30 градаций пурпурных цветов. По насыщенности (при неизменном цветовом тоне) глаз в зависимости от цветового тона различает от 4 (для желтого) до 25 (для красного) градаций. Если учесть различие в цветоощущении при изменении яркости, то общее число цветов, различаемых глазом, оказывается равным нескольким тысячам. К вопросу о числе различаемых глазом оттенков мы еще вернемся при рассмотрении кодовой системы цветного телевидения.

Важной характеристикой цветового зрения является *спектральная чувствительность* глаза. Эта характеристика показывает, какое ощущение *светлоты* вызывает монохроматическое излучение *неизменной* интенсивности (мощности излучения) при изменении длины волны. На рис. 10 (см. цветную вклейку) приведены несколько цветных полей с приблизительно неизменной интенсивностью отраженных световых лучей. Красные и синие поля кажутся нам более темными, чем желто-зеленые. Эквивалентная светлота каждого поля изобржается соответствующим серым полем.

Здесь уместно отметить, что в черно-белом телевидении, т. е. когда на экране приемника воспроизводятся только яркостные характеристики воспроизводимых объектов, передача цветных деталей должна следовать отмеченным свойствам глаза. Цветные детали с одинаковой интенсивностью отраженного света должны в зависимости от цвета воспроизводиться серыми участками с яркостью, соответствующей серым полям на рис. 10.

Выполнение этого требования обеспечивается тем, что результирующая спектральная характеристика передающей и приемной трубок, т. е. зависимость яркости воспроизводимого участка изображения от цвета (длины волны излучения) соответствующего участка объекта, при неизменном световом потоке, попадающем в объектив, сходна с кривой спектральной чувствительности глаза.

Кривая спектральной чувствительности «среднего» глаза (усредненный результат большого числа опытов) приведена на рис. 11. На оси ординат отложены относительные единицы. Максимальной чувствительностью глаз обладает в желто-зеленой части спектра (длина волны 555 *ммк*). С помощью кривой можно определить, какими должны

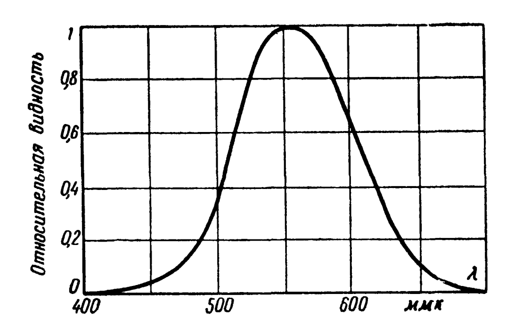


Рис. 11. Кривая видности глаза человека.

быть интенсивности излучений различных монохроматических источников для того, чтобы их субъективные светлоты были одинаковы. Так, например, если имеются три источника с длинами волн излучений 650 *ммк* (красный), 530 *ммк* (зеленый) и 460 *ммк* (синий), то ординаты кривой соответственно равны 0,11, 0,86 и 0,05. Если интенсивность источника красного принять за единицу, то для получения одинаковой светлоты мощность излучения источника зеленого света должна быть в 7,8 раз меньше, а синего — в 2,2 раза больше.

Из характеристик цветового зрения, существенных для цветного телевидения, нам нужно рассмотреть еще вопрос о различимости мелких цветных деталей.

Разрешающая способность глаза (способность различать мелкие детали) зависит в большой степени от цветности различаемых мелких деталей. Этот факт был установлен давно и характер изменения разрешающей способности

и цветовосприятия мелких деталей изучается непрерывно до наших дней.

Наилучшей разрешающей способностью глаз обладает в том случае, когда объекты освещаются монохроматическим зеленым или желто-зеленым светом. При увеличении длины волны монохроматического света, равно как и при уменьшении длины волны, разрешающая способность заметно снижается, как это следует из графика, изображенного на рис. 12.

При восприятии мелких деталей изображений, окрашенных в разные цвета, наблюдаются следующие явления.

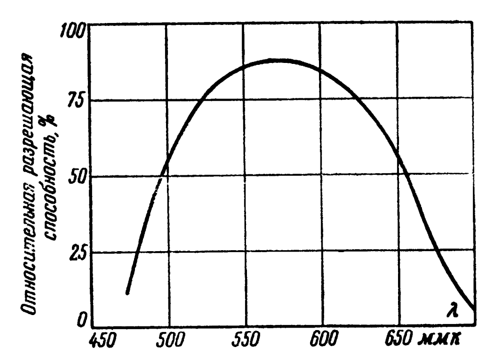


Рис. 12. Кривая зависимости разрешающей способности от длины волны монохроматических лучей, освещающих черные объекты на белом фоне.

С постепенным уменьшением размеров становятся не отличимыми от эквивалентных по яркости серых деталей прежде всего фиолетовые детали. Затем труднее становится отличить от серых желто-оранжевые элементы. Далее наблюдатели начинают путать по цветовому тону коричневые с красновато-малиновыми элементами, а синие — с зелеными. При этом красные детали продолжают ясно отличаться от сине-зеленых. В целом цветности с резко выраженной синевой теряют последнюю, тогда как цветности с малой синевой, ощущаются сине-фиолетовыми, причем все цветности становятся субъективно менее насыщенными.

При дальнейшем уменьшении размеров деталей красные сливаются с серыми эквивалентной яркости и, наконец, сине-зеленые также становятся не отличимыми от серых.

Для еще меньших объектов нормальное зрение вообще не различает деталей по цветности, а различает их лишь по яркости.

В связи с указанными фактами при развертке цветных изображений одинаковая субъективная четкость может быть достигнута при различных размерах элементов растра, окрашенных в разные цвета.

Эти факты послужили основой тщательно поставленных опытов, в результате которых были установлены полосы частот для телевизионных сигналов, воздействующих на оконечное трехцветное воспроизводящее устройство, т. е. сигналов, управляющих яркостями основных цветов приемных трубок.

Опыты показали, что правильная цветопередача всего изображения и его деталей требует наличия трех смешиваемых цветов только для деталей, размеры которых соответствуют при развертке (на 525 строк) частотам ниже 0,5 *Мгц*. Детали, размеры которых соответствуют при развертке частотам 0,5—1,5 *Мгц*, хорошо воспроизводятся двумя цветами — результатом смешения оранжевого и сине-голубого цветов, т. е. могут быть воспроизведены при отсутствии цветов, являющихся результатом смешения синевато-пурпурного и желтовато-зеленого.

Мелкие детали, с размерами, соответствующими при развертке частотам выше 1,5 *Мгц*, могут быть воспроизведены лишь яркостной характеристикой, т. е. черно-белыми. К таким деталям глаз уже цветнослепой. Это обстоятельство реализуется, как мы увидим позднее, в одновременных системах цветного телевидения и позволяет существенно сократить общую полосу требуемых частот.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТА

Воспроизведение всей гаммы цветов в телевидении основано на смешении трех основных цветов. До сих пор мы рассматривали смешение в основном с качественной стороны, не учитывая количественных соотношений. Подойдем теперь к этим вопросам более строго.

Вопросами смешения цветов занимается колориметрия — наука об измерении цвета. Одной из основных задач, решаемых колориметрией, является определение количественных соотношений между заданными смешиваемыми излучениями и равным по ощущению сложным цветом. Коль скоро результат исследований и расчетов, в конечном итоге, базируется на ощущении, а последнее различно

у различных наблюдателей, установлены единые усредненные характеристики органа зрения. Эти характеристики основаны на многочисленных опытах; к ним, например, относится рассмотренная выше кривая спектральной чувствительности глаза — кривая видности.

Введение усредненных характеристик как бы позволяет исключить из рассмотрения субъективные факторы и измерять цвет так же, как измеряются веса, объемы и т. п.

Факт смешения цветов может быть записан в виде уравнения, в правой части которого помещены складываемые цвета, а в левой части — результат смешения этих цветов:

$$f'F = r'R + g'G + b'B.$$

В этом уравнении R, G, B обозначают основные единичные цвета (R показывает, что в смеси участвует одна единица красного цвета, G — единица зеленого, B — единица синего[1]), а множители r', g', b', называемые модулями цвета, указывают, какое количество единиц цветов R, G, B участвует в смеси. F означает некоторый условный единичный цвет, цветность которого совпадает с цветностью составленной смеси, а f' — модуль этого цвета.

Модуль суммы цветов равен сумме модулей складываемых цветов, поэтому:

$$\frac{r'}{f'} + \frac{g'}{f'} + \frac{b'}{f'} = 1.$$

Отношения модулей основных цветов к модулю результирующего цвета называются трехцветными коэффициентами и обозначаются соответственно r, g, b; теперь можно записать:

$$F = rR + gG + bB.$$

Трехцветные коэффициенты показывают, в каком соотношении нужно смешивать основные цвета для получения заданной цветности смеси.

В распространенных колориметрических системах за основные цвета принимают монохроматические излучения с длинами волн 700 *ммк* (красный), 546 *ммк* (зеленый) и

[1] Буквы R, G и B для обозначения соответственно красного, зеленого и синего цветов широко используются в колориметрии у нас и заграницей. Эти буквы являются начальными в словах Red (англ). и Rot (нем.) — красный, Green (англ.) и Grün (нем.) — зеленый и Blue (англ.) и Blau (нем.) — синий.

436 *ммк* (синий). На рис. 13 приведены графические зависимости значения трехцветных коэффициентов *r*, *g*, *b* указанных основных цветов, полученные как средние результаты большого числа опытов. Ординаты этих графиков показывают, в каких соотношениях нужно смешать монохроматические излучения *R*, *G*, *B* с указанными длинами волн для получения смеси, субъективно равной монохроматическому излучению, длина которого определяется абсциссой.

Строго говоря, один из трехцветных коэффициентов всегда является величиной отрицательной (за исключени-

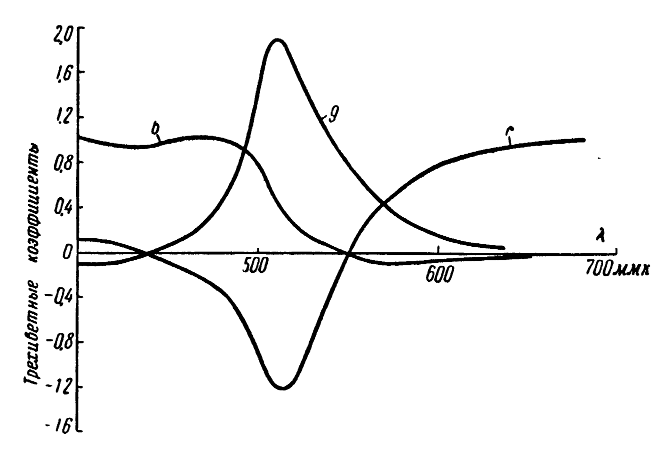


Рис. 13. Трехцветные коэффициенты.

ем длин волн, больших 650 *ммк*, где *b* становится равным нулю). Понятие «отрицательный цвет» лишено физического смысла, но в данном случае это подтверждает высказанное ранее положение, что смешением монохроматических излучений нельзя получить чистый спектральный цвет; смесь не будет обладать 100%-ной насыщенностью.

В общем случае, если одно из слагаемых уравнения отрицательно, например,

$$F_1 = -r_1R + g_1G + b_1B,$$

то это означает, что цветность F_1 не может быть образована смешением данных основных цветов — она расположена на графике вне треугольника *RGB*.

Используя формальный перенос отрицательного слагаемого в левую часть уравнения, можно записать:

$$F_1+r_1R=g_1G+b_1B.$$

Физически такое равенство означает, что смесь, образованная смешением двух основных цветов G и B, субъективно сходна со смесью цвета F_1 и того основного цвета, трехцветный коэффициент которого имеет отрицательное значение (R).

Задача определения цветового тона и насыщенности некоторой цветности, полученной в результате смешения других цветов, может быть решена с помощью цветового графика — геометрического представления вопросов смешения.

Поскольку мы имеем дело с тремя независимыми переменными r, g и b, геометрические модели и графики должны располагаться в трехмерном пространстве. Однако, если приводить в каждом конкретном случае задачу смешения к единичному цвету, т. е. переходить от абсолютных значений (модулей) к относительным (трехцветным коэффициентам), то, имея в виду равенство

$$r+g+b=1,$$

можно перейти к решению задач на плоскости двух переменных, например r и g. Тогда величина (координата) третьей переменной b определится из соотношения

$$b=1-(r+g).$$

Заметим, что физически переход к трехцветным коэффициентам означает независимость цветового графика от количества цвета (светлоты) и только зависимость от его качественных цветовых свойств — цветового тона и насыщенности.

Выберем для построения цветового графика прямоугольную систему координат (как более простую) и будем откладывать по оси абсцисс величину r, а по оси ординат величину g (рис. 14). Точка с координатами $r=1$; $g=0$ (т. е. $b=0$), соответствует положению на графике единичного цвета R, ибо при этом $F=R$. Точка $r=0$; $g=1$ ($b=0$) соответствует положению единичного цвета G. В начале координат расположится единичный цвет B ($r=0$, $g=0$, т. е. $b=1$). Соединив R, G и B прямыми, мы получим тре-

угольник RGB, внутри которого расположены все реальные цветности, получаемые от смешения единичных цветов R, G и B.

Мы уже указывали, что цветовой тон и насыщенность могут быть определены графически при наличии на графике точки, соответствующей белому цвету. Понятие белый цвет весьма неопределенно — оно относится как к дневному, так и к вечернему солнечному свету, к свету лампы накаливания и т. п., хотя спектральный состав излучений

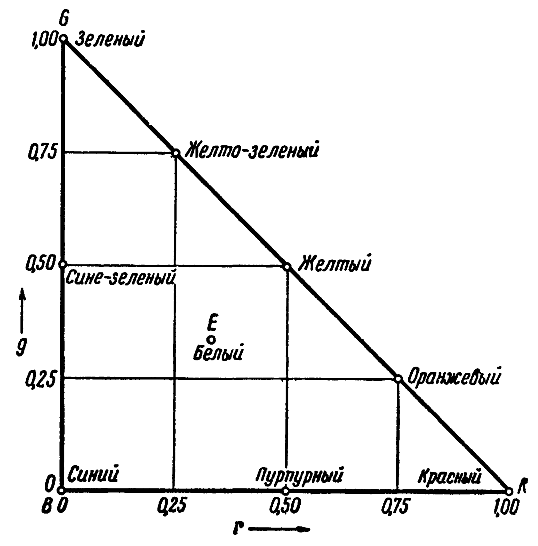


Рис. 14. Треугольник RGB в прямоугольной системе координат.

в каждом случае различен. Для того чтобы производить численные расчеты, нужно ввести определенность в понятие белый цвет, т. е. заранее оговорить источник. Естественно, что для каждого из источников точка на графике, соответствующая белому цвету, будет занимать особое место.

В частности, удобным при построении цветовых графиков оказывается так называемый равноинтенсивный белый цвет, полученный от смешения одинаковых количеств монохроматических излучений RGB с указанными выше длинами волн. Этот цвет обычно обозначается буквой E. Положение точки E на графике определится, очевидно, координатами $r={}^1/_3$ и $g={}^1/_3$. В данной системе координат точка E

находится в центре тяжести треугольника основных цветов.

Наиболее насыщенные цвета, получаемые от смешения основных *R*, *G*, *B*, расположены вдоль прямых, соединяющих вершины треугольника. По мере приближения к точке *E* насыщенность цвета уменьшается.

Нанесем на цветовой график точки, соответствующие положению чистых спектральных (насыщенных) цветов. Для этого воспользуемся кривыми зависимостей *r* и *g* от длины волны (рис. 13), из которых мы непосредственно определяем координаты искомых точек.

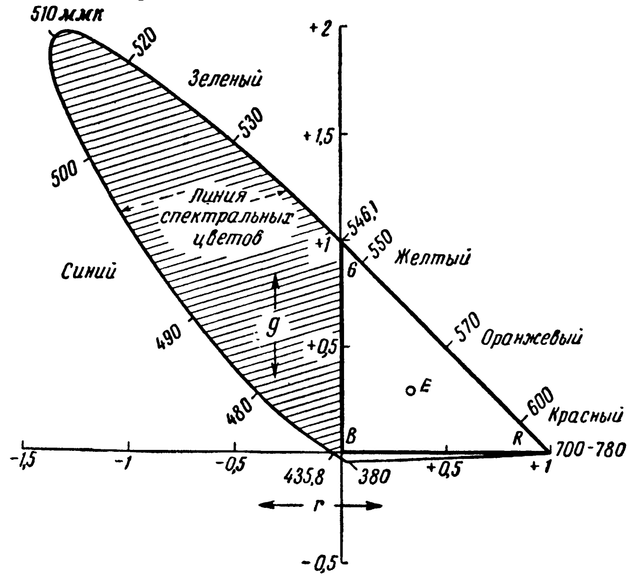


Рис. 15. Цветовой график колориметрической системы *RGB*.

Нанеся достаточно большое число точек, получим плавную кривую — линию спектральных цветов (рис. 15). В соответствии с ранее установленными положениями линия спектральных цветов, как и следовало ожидать, находится вне треугольника *RGB*. Только в желто-красной части спектра сторона треугольника *GR* близко примыкает к линии спектральных цветов. Крайние точки спектральной линии соединяют прямой линией, вдоль которой располагаются пурпурные цвета, получаемые в результате смешения красного и синего цветов.

Произведя подобное построение, мы упорядочили шкалу

спектральных цветов, ориентировали относительно начала координат линию спектральных цветов и положение белого цвета.

Цветовой график в системе координат *r*, *g*, *b* обладает практическим неудобством, связанным с тем, что координаты некоторых реальных цветов имеют отрицательные значения; это затрудняет цветовые расчеты. Поэтому Международной комиссией по освещению (МКО) в 1931 г. была разработана новая колориметрическая система, в кото-

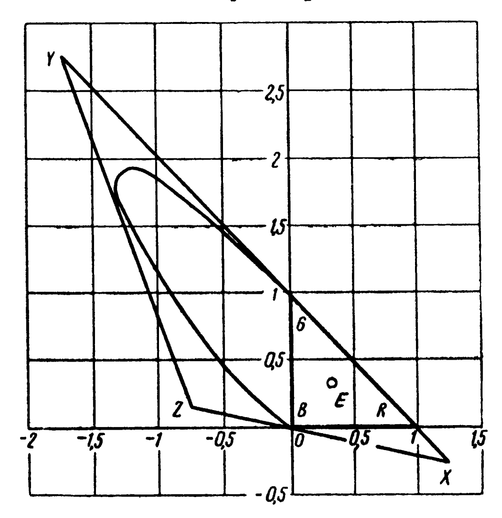


Рис. 16. Преобразование системы *RGB* в систему *XYZ*.

рой все реальные цвета изображаются положительными составляющими. В этой системе положение точки *E* занимает центр тяжести прямоугольного треугольника, образованного фиктивными основными цветами *XYZ*.

Трансформация цветового графика системы *RGB* в график системы *XYZ* иллюстрируется рис. 16. Треугольник *RGB* вписан в некоторый треугольник *XYZ* так, что линия спектральных цветов также вписана в этом треугольник. Таким образом, все поле реальных цветов находится внутри треугольника *XYZ*.

С помощью особых преобразований график пересчитывается в прямоугольную систему координат x, y. Точке *Y* соответствуют координаты $x=0$ и $y=1$, точке *X* — координаты $x=1$ и $y=0$ и точке *Z* — координаты $x=0$ и $y=0$,

а координаты равноэнергетического белого цвета E соответствуют $x=0{,}33$ и $y=0{,}33$.

Цветовой график системы XYZ приведен на рис. 17 (см. цветную вклейку). Нужно помнить, что основные цвета системы X, Y и Z, расположенные вне зоны, ограниченной линией спектральных цветов, являются символическими цветами и служат лишь для выражения цветов смеси.

Для определения цветностей, которые можно получить от смешения трех каких-нибудь основных цветов, необходимо нанести на график точки, соответствующие этим цветам, и построить треугольник, внутри которого расположатся цветности смеси. Дополнительные цвета на графике определяются с помощью прямой, которая проводится через точку E.

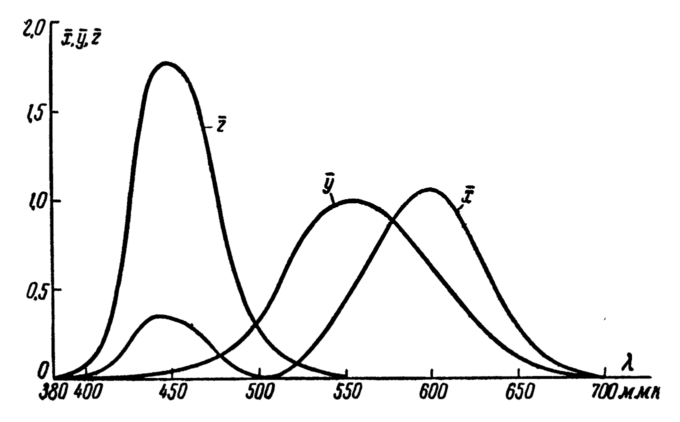


Рис. 18. График зависимости удельных компонент от длины волны.

Проводя аналогию между основными цветами RGB и фиктивными основными цветами XYZ, можно говорить о трехцветных коэффициентах в этой последней системе, зависимости координат точек, образующих линию спектральных цветов в цветовом графике системы XYZ, от длины волны, т. е. трехцветных коэффициентах x, y и z, весьма сходных с коэффициентами на рис. 13, за исключением того, что x, y и z принимают лишь положительные значения.

При цветовых расчетах весьма часто употребляются так называемые удельные компоненты, показывающие,

в каких количествах нужно смешивать цвета XYZ для получения одного ватта монохроматического излучения данной длины волны. График зависимости удельных компонент $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$ от длины волны приведен на рис. 18. Заметим, что кривая для $\bar{y}$ является спектральной характеристикой глаза (см. рис. 11), — это одно из основных положений, которые легли в основу разработки данной системы. В связи с последним ордината любой точки цветового графика непосредственно измеряет относительную яркость данного единичного цвета.

С помощью удельных компонент можно определить трехцветные коэффициенты (или модули) любого сложного

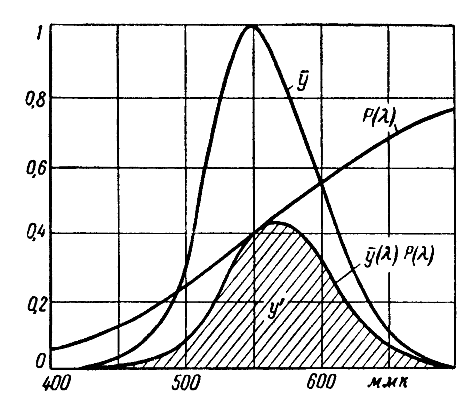


Рис. 19. Определение модуля цвета сложного излучения.

излучения. Пусть, например, задана графически зависимость мощности излучения некоторого источника от длины волны в относительных единицах (скажем, отнесенная к пиковому значению мощности). Для определения модуля цвета y' нужно каждое из значений ординаты кривой $P(\lambda)$ (рис. 19) умножить на соответствующее по длине волны значение ординаты кривой $\bar{y}$. В результате получим некоторую новую кривую $\bar{y}(\lambda)\ P(\lambda)$, площадь которой численно выражает значение модуля цвета y'. Аналогично можно определить x' и z'. Для определения x, y и z нужно значение каждого из соответствующих модулей разделить на сумму всех трех модулей.

Знание трехцветных коэффициентов позволяет нанести на цветовой график точку, соответствующую цветности

сложного излучения, т. е. определить его цветовой тон и насыщенность.

Далее с помощью цветовых графиков без трудоемких расчетов можно решить задачу создания цветности, субъективно сходной с цветностью данного сложного излучения, но полученную искусственно путем смешения имеющихся

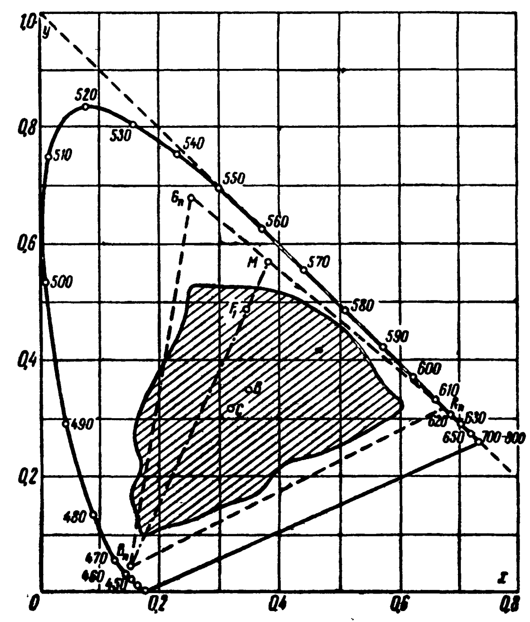


Рис. 20. Цветовой график, на котором заштрихована область наиболее часто встречающихся цветов.

основных цветов. Пусть, например, известно, что некоторый излучатель создает цветность F_1, изображаемую соответствующей точкой на цветовом графике (рис. 20). Имеются три основные цвета, например R_n, G_n и B_n, которые при смешении в отношениях, определяемых трехцветными коэффициентами, должны создать цветность, соответствующую F_1, т. е.

$$F_1 = rR_n + gG_n + bB_n.$$

Определение трехцветных коэффициентов производится следующим образом: одну из вершин треугольника $R_nG_nB_n$,

например B_n, соединяют прямой линией до пересечения с прямой R_nG_n точка (M). Тогда трехцветные коэффициенты определяются как отношения следующих отрезков:

$$r = \frac{F_1B_n}{B_nM} \frac{MG_n}{G_nR_n};$$

$$g = \frac{F_1B_n}{B_nM} \frac{MR_n}{G_nR_n};$$

$$b = \frac{MF_1}{B_nM}.$$

Если точка F_1 лежит вне треугольника основных цветов, то один или два трехцветных коэффициента будут отрицательными.

Глава вторая

ПРИНЦИПЫ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

5. ВОЗМОЖНОСТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Тот факт, что сложные излучения, ощущаемые зрительным органом как цвет, могут быть субъективно точно охарактеризованы тремя показателями, позволяет реально подойти к осуществлению задачи цветной телевизионной передачи.

Действительно, представим себе, что в нашем распоряжении имеется некоторое оконечное устройство, подобное электронно-лучевой трубке, в котором можно с помощью электрических сигналов управлять не только яркостью свечения пятна, но и его цветовым тоном и насыщенностью. Тогда, получив с помощью другого передающего анализирующего устройства сведения о яркости, насыщенности и цветовом тоне передаваемого участка объекта в виде электрических сигналов и передав эти сигналы к приемнику, мы осуществим на расстоянии цветовоспроизведение.

Таким образом, для практического осуществления подобной системы цветного телевидения нужны следующие два основных устройства:

1) устройство, анализирующее световой поток от данного элемента объекта, преобразующее свет в три электрические сигнала (один из сигналов своей величиной ото-

бражает яркость данного элемента, другой — цветовой тон и третий — насыщенность);

2) устройство, преобразующее три электрических сигнала в яркость, цветовой тон и насыщенность данного элемента передаваемого изображения.

Очевидно, что для передачи электрических сигналов цветного телевидения в этом случае нужны три канала связи.

В настоящее время отсутствуют подобные оконечные устройства. Наличие таких устройств позволило бы осуществить цветную передачу как естественное дополнение к черно-белому телевидению, в котором передаются и воспроизводятся только яркостные характеристики объектов. Здесь уместно отметить, что в современных перспективных системах цветного телевидения, несмотря на отсутствие указанных оконечных устройств, в электрическом канале осуществляют преобразования, в результате которых получаются и далее передаются к приемнику сигнал, отображающий яркость объекта, и сигналы, отображающие его цветность (см. гл. 3).

Однако нам известен другой факт, заключающийся в том, что почти любой цвет может быть воссоздан путем смешения в определенных пропорциях нескольких определенных основных цветов. Этот факт и лежит в основе построения современных систем цветного телевидения; реальным основанием практической осуществимости здесь является возможность создания имеющимися средствами оконечных анализирующих и синтезирующих устройств.

Число основных цветов во всех системах выбирается равным трем; при этом, как мы знаем, можно воспроизвести все цветовые тона и большое число градаций насыщенности. При большем числе основных цветов можно было бы воспроизвести более насыщенные цвета, однако возрастающие сложности аппаратуры не окупают в общем незначительный эффект, создаваемый за счет увеличения числа основных цветов [1].

Использование только трех основных цветов не является существенным ограничением еще и потому, что в природе мы не так уж часто наблюдаем предметы, окраска которых насыщена, — монохроматические излучатели и предметы, отражающие свет в весьма узком диапазоне длин волн встречаются редко. На цветовом графике, изо-

---

[1] Этим объясняется, что в цветной кинематографии, как и в цветном телевидении, используется «трехцветка».

браженном на рис. 20, выделена область цветов, наиболее часто встречающихся в природе. Там же пунктиром обозначен треугольник, в вершинах которого находятся основные цвета распространенных телевизионных воспроизводящих устройств (R_n, G_n и B_n). Видно, что области наиболее часто встречающихся цветов и цветов, которые можно создать путем смешения трех основных, почти совпадают.

Простейшим способом создания цветного телевизионного изображения является использование трех изображений, окрашенных в основные цвета, и оптическое совмещение этих изображений на одном общем экране. Нужные основные цвета каждого из изображений могут создаваться двумя видами излучателей. Первый из них — источники с непосредственно нужным спектральным составом излучения; второй — использование белых источников света с последующей фильтрацией световых потоков с помощью окрашенных пленок, стекол или зеркал. В обоих случаях источниками света в настоящее время являются люминесцирующие экраны электронно-лучевых трубок.

Изменение управляющих напряжений трубок приведет к изменению яркостей соответствующих свечений. Поскольку эти излучения смешиваются, то, подбирая соотношения между управляющими напряжениями, можно создать при смешении требуемый цвет.

Использование люминофоров с нужным цветом свечения — светотехнически более выгодный способ, ибо вся мощность бомбардирующих электронов, которая преобразуется в свет, непосредственно создает излучение с нужным спектральным составом. При использовании светофильтров часть света ими поглощается и в итоге яркость изображения уменьшается.

На рис. 21 (см. цветную вклейку) изображены оптические устройства цветных телевизионных приемников. В одном из приемников (рис. 21,*а*) наблюдатель с помощью системы полупрозрачных цветоокрашенных зеркал одновременно рассматривает три экрана электронно-лучевых трубок. Трубки весьма точно установлены так, что контуры изображений при наблюдении совпадают.

На экране одной из трубок, излучающей красные лучи, создано изображение, содержащее лишь те элементы, которые соответствуют участкам поверхности передаваемого объекта, окрашенным в красный цвет или частично содержащим красный цвет в сложном цвете. Вторая трубка излучает лучи зеленого цвета, и на ее экране возникает изо-

бражение зеленых элементов объекта или тех участков поверхности объекта, которые частично содержат зеленый цвет в сложном цвете. Экран третьей трубки — синий.

Во втором из оптических устройств (рис. 21,*б*) зритель наблюдает изображение, созданное на общем светорассеивающем экране с помощью трех объективов. Последние проектируют на экран свет, испускаемый тремя цветоокрашенными экранами проекционных электронно-лучевых трубок.

Предположим, что в данный момент времени передается красный участок некоторого объекта. При этом соответствующие точки поверхности красной трубки будут светиться с наибольшей яркостью, эти же участки на экранах синей и зеленой трубок будут затемнены. Аналогично при передаче синих и зеленых деталей объекта будут светиться лишь соответствующие участки на экранах либо синей, либо зеленой трубок.

Относительные интенсивности свечений экранов трубок при передаче нескольких характерных цветов иллюстрируются графиками, изображенными на рис. 22. Белый цвет получается при одновременном свечении всех трех трубок, пурпурные цвета — при одновременном свечении красной и синей трубок, оранжевый — при свечении красной и зеленой трубок и т. д. Менее насыщенные цвета создаются одновременным свечением всех трубок.

Для получения при смешении некоторого цвета свечения экранов должны быть прямо пропорциональными модулям этого цвета, выражающим количества выбранных основных цветов. В цветном телевидении обычно не выдерживается абсолютное соответствие цвета изображения цвету объекта. Важно воспроизвести ц в е т н о с т ь объекта, а потому интенсивности свечения экранов могут быть прямо пропорциональными трехцветным коэффициентам.

Предположим, что созданы люминофоры, излучающие цвета X, Y и Z, тогда, если трехцветные коэффициенты некоторой воспроизводимой цветности F в системе XYZ суть x_1, y_1 и z_1, т. е.

$$F = x_1 X + y_1 Z + z_1 Z,$$

интенсивность свечения экранов, а значит и управляющие напряжения u_x, u_y и u_z должны быть соответственно пропорциональными этим коэффициентам: $u_x = kx_1$; $u_y = ky_1$; $u_z = kz_1$ (где k — множитель пропорциональности).

Предположим далее, что канал связи не вносит изменений в соотношение величин u_x, u_y и u_z, а меняет лишь в одинаковое число раз их значения; тогда функцией телевизионного передатчика является создание **трех** напряжений, пропорциональных u_x, u_y и u_z, т. е. передат-

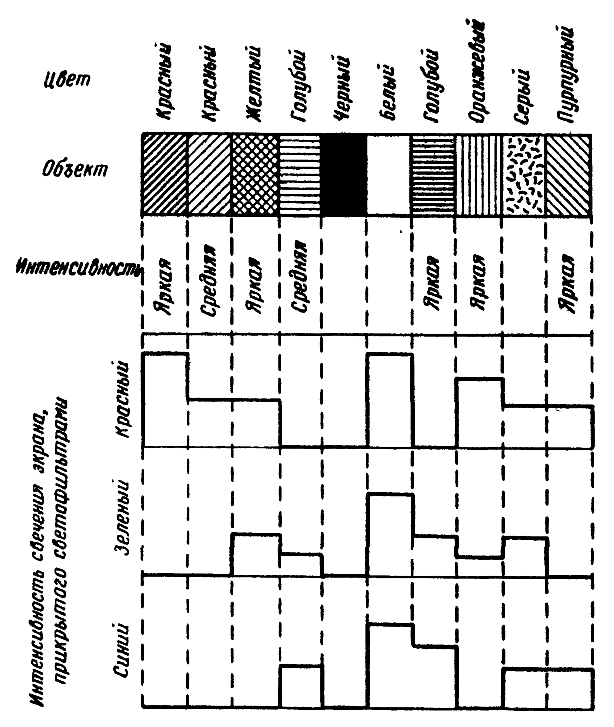


Рис. 22. Графики, характеризующие интенсивности свечения экранов приемных трубок при передаче нескольких характерных цветов.

чик цветного телевидения является цветоанализирующим устройством, создающим три сигнала, пропорциональных модулям (или трехцветным коэффициентам) данного цвета, воспроизводимого смешением основных цветов приемника.

Одновременное создание трех напряжений осуществляется с помощью передающей камеры, содержащей три передающие трубки [1], каждая из которых прикрыта **свето-**

[1] Развертки во всех трубках осуществляются синхронно и синфазно.

фильтром с нужной спектральной характеристикой. Если основные цвета приемника суть X, Y и Z, то результирующие спектральные характеристики совокупностей светофильтр — передающая трубка[1] должны быть соответственно сходными со спектральными зависимостями удельных компонент $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$ (рис. 18). При этом процесс спектрального преобразования в каждой из трубок по сути сходен с графическим преобразованием, как на рис. 19, и выходные напряжения передающих трубок соответственно пропорциональны модулям x_1', y_1' и z_1' *.

Если перед камерой расположен световой объект той же цветности, но большей (или меньшей) яркости, то все сигналы в одинаковое число раз увеличиваются (или уменьшаются). Соотношение управляющих сигналов определяет цветность изображения, их абсолютные величины (сумма мгновенных значений) — кажущуюся яркость свечения смеси.

Мы знаем, что создание цветов X, Y и Z является неразрешимой задачей; реально в приемниках выбираются люминофоры, свечения которых близки к насыщенным: красному (R), зеленому (G) и синему (B).

В этом случае для правильной цветопередачи спектральные характеристики светофильтров (конечно, с учетом характеристик передающих трубок) должны иметь иную форму, такую, чтобы создаваемые трубками управляющие сигналы вызывали свечения, создающие при смещении цветность объекта. Эти спектральные характеристики зависят не только от удельных компонент, но и от трехцветных коэффициентов основных цветов приемника. Так, например, трубка, чувствительная к красной части спектра, должна иметь спектральную характеристику S_R, выражаемую так:

$$S_R = (y_G z_B - y_B z_G)\bar{x} + (z_G x_B - z_B x_G)\bar{y} + (x_G y_B - x_B y_G)\bar{z}.$$

Спектральная характеристика зеленого светофильтра аналогично зависит не только от $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$, но и от x_R, y_R,

[1] Спектральная характеристика фотокатода передающей трубки обычно неравномерна, поэтому нужно учитывать не только спектральную характеристику светофильтра, но и передающей трубки.

* Так как в канале связи может быть установлено произвольное усиление без изменения соотношения между сигналами, то для любого цвета можно, например, установить соответствие модулей трехцветным коэффициентам.

z_R; x_B, y_B, z_B и т. д. (x_R, y_R, z_R; x_G, y_G, z_G; x_B, y_B, z_B — трехцветные коэффициенты основных цветов R, G, B в системе XYZ).

Так как форма характеристик светофильтров передатчика зависит от выбора основных цветов приемника, то при наличии многих приемников во всех приемниках должны быть соответственно одинаковые основные цвета.

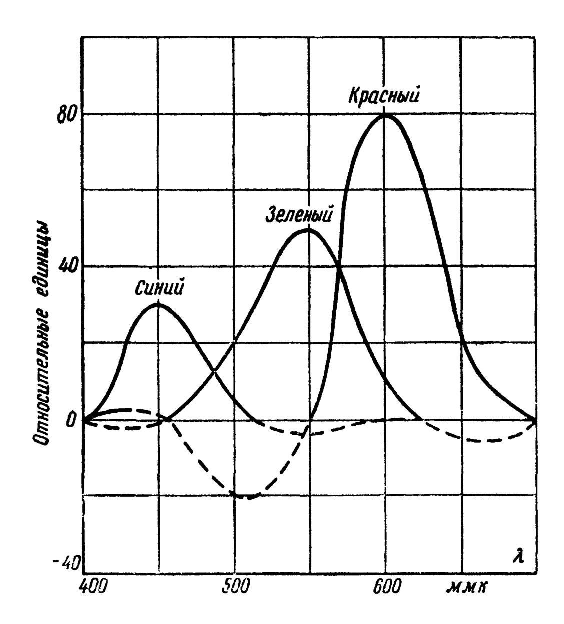


Рис. 23. Теоретические и реальные спектральные характеристики светофильтров цветного телевизионного передатчика.

На рис. 23 приведены графики теоретических спектральных характеристик светофильтров, вычисленных для распространенных на практике основных цветов. Ординаты кривых имеют при некоторых длинах волн отрицательные значения. Это означает, что для воспроизведения некоторых цветов требуется получение отрицательных сигналов, соответствующих «отрицательным цветам», о которых мы уже говорили ранее. Техника не располагает средствами подобного воспроизведения, а потому телевизионная си-

стема способна лишь приближенно воспроизводить цвета объектов [1].

Реальные спектральные характеристики требуемых светофильтров, наиболее приближающиеся к теоретическим, изображены на рис. 23 сплошными линиями.

6. ОДНОВРЕМЕННАЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМЫ

Принципиальная схема простейшей цветной телевизионной системы приведена на рис. 24. Объектив проектирует на светочувствительные поверхности передающих трубок идентичные изображения. Развертки во всех трубках работают синхронно и синфазно, т. е. одновременно начинаются с верхних строк и движутся в дальнейшем с одинаковыми скоростями. Если в некоторый момент времени происходит развертка красного элемента объекта, то на выходе «красной» трубки создается значительный сигнал, ибо эта трубка, прикрытая соответствующим фильтром, чувствительна к данной области спектра. На выходах «зеленой» и «синей» трубок сигналы равны нулю (или очень малы). При передаче зеленых объектов большой сигнал появляется только на выходе «зеленой» трубки и т. д. При передаче большинства реальных цветов сигналы, отличные от нуля, образуются на выходах всех трех трубок.

В качестве светофильтров используются окрашенные стекла, пленки или специальные пластинки, так называемые цветоизбирательные зеркала. Одно из таких зеркал, установленное под углом в 45° к оси, отражает красные лучи и пропускает синие и зеленые; второе зеркало пропускает зеленую часть спектра и отражает сине-фиолетовую. Оптическая схема камеры поясняется рис. 24.

Описанная цветная телевизионная система называется одновременной, потому что три цветовых сигнала одновременно создаются, передаются по трем каналам связи и воздействуют на трехцветное приемное устройство. В сущности в этой системе одновременно действуют три телевизионных системы.

Нужно заметить, и это весьма существенно с практической точки зрения, что четкости каждого из трех изображений могут быть сделаны различными. Как мы выяснили,

---

[1] В каналах связи путем раздельной регулировки усилений возможно изменить соотношение между управляющими сигналами с тем, чтобы ввести соответствие между цветовым тоном объекта, искаженным из-за изменения соотношения между сигналами при прохождении света через реальные фильтры, и цветовым тоном изображения.

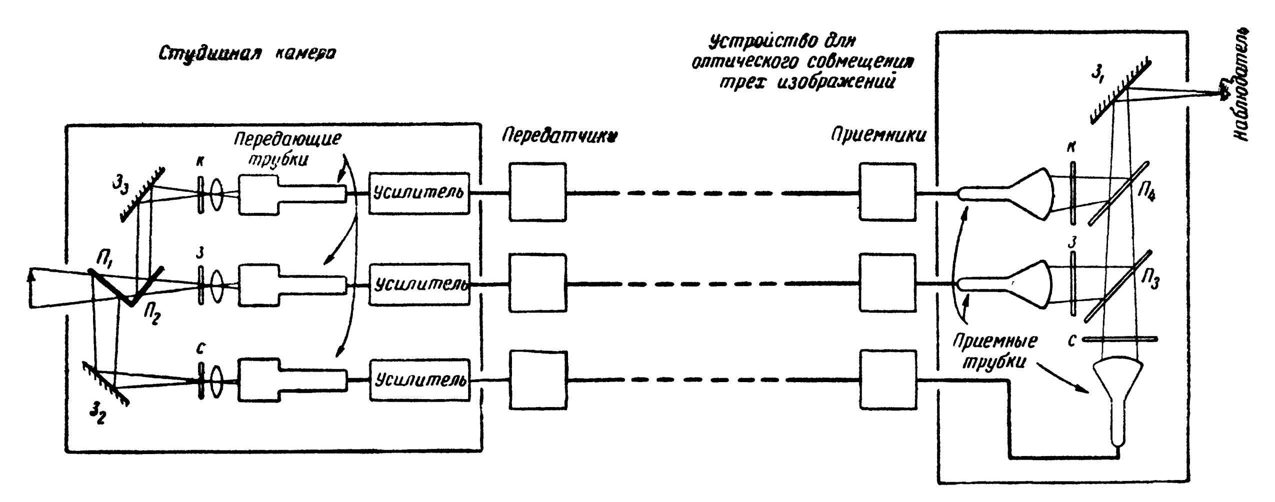


Рис. 24. Принципиальная схема одновременной системы цветного телевидения.

$П_1$, $П_2$, $П_3$ и $П_4$ — полупрозрачные пластинки; $З_1$, $З_2$ и $З_3$ — зеркала; *к*, *з* и *с* — красный, зеленый и синий светофильтры.

глаз обладает неодинаковой разрешающей способностью к различным по цвету излучениям, поэтому размеры синих (а также в некоторой мере и красных) элементов растров соответствующих изображений могут быть значительно бо́льшими, чем размеры элементов растра зеленого изображения. В связи с этим ширина полосы пропускания канала зеленого изображения должна быть наибольшей, а синего канала может быть в несколько раз уже.

Современная передающая телевизионная станция является весьма сложным сооружением, поэтому осуществление системы с одновременной передачей цветов в таком виде, как это показано на рис. 24, практически весьма трудно выполнимо. Действительно, для цветного телевизионного вещания по этому способу необходимо соорудить три отдельных передатчика, работа которых должна быть точно согласована по излучаемой мощности. Приемная установка также должна состоять из трех отдельных приемников.

В процессе опытной разработки этой системы оказалось возможным частично упростить ее путем использования методов, сходных с многоканальной междугородной телефонной связью на поднесущих частотах.

Блок-схема передающего устройства изображена на рис. 25. С выхода студийной камеры подаются три видеосигнала, соответствующие красному, зеленому и синему изображениям. Полосы частот зеленого и красного изображений простираются от 0 (точнее от 25 *гц*) примерно до 5 *Мгц* (при 625 строках разложения). Полоса частот синего изображения, как показали опыты, может быть уменьшена до 1—1,5 *Мгц*.

Зеленые сигналы непосредственно поступают к смесителю, который представляет собой усилитель с тремя входами и общим выходом. Синие и красные сигналы непосредственно не попадают в смеситель. Они модулируют вспомогательные высокочастотные генераторы, один из которых генерирует колебания с частотой 7, а другой — 9 *Мгц*. Модулированные колебания с несущими частотами 7 и 9 *Мгц*, прежде чем попасть в смеситель, проходят через фильтры, подавляющие одну из боковых модуляционных полос; у колебания с несущей частотой 7 *Мгц* — верхнюю, а у колебания с несущей частотой 9 *Мгц* — нижнюю. Таким образом, к смесителю поступают три рода сигналов: видеосигналы (зеленые), занимающие полосу от 0 до 5 *Мгц*, синие сигналы с несущей 7 *Мгц* и нижней боковой

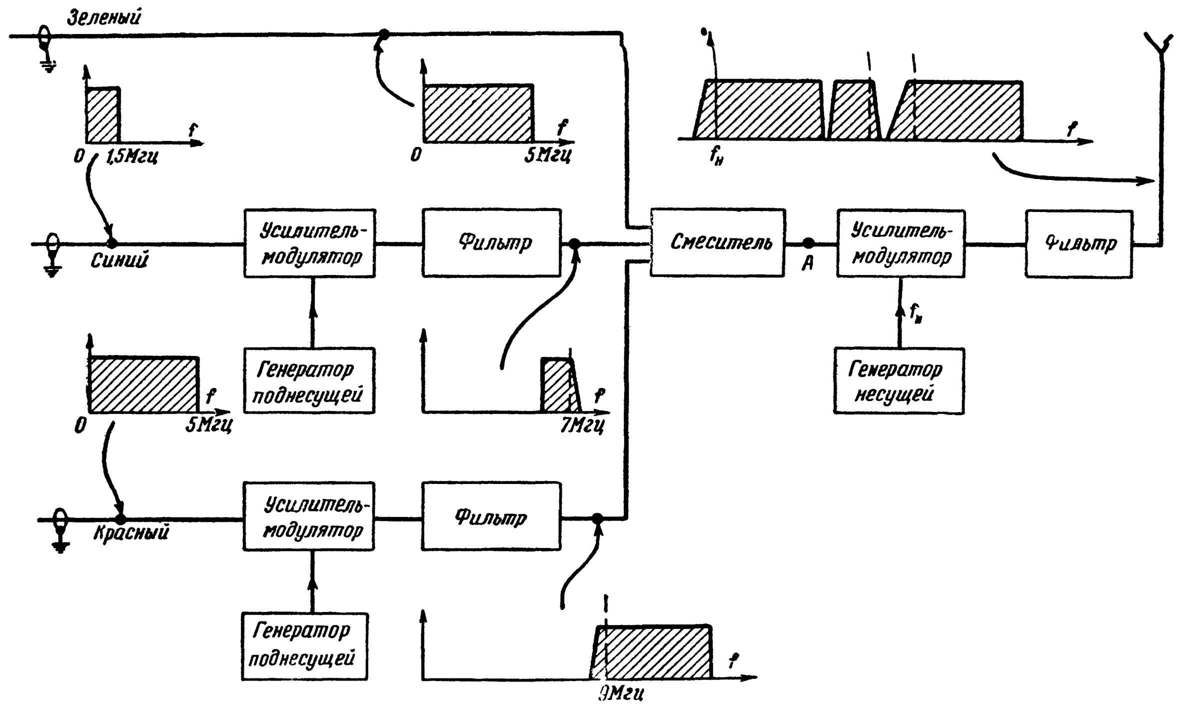


Рис. 25. Блок-схема передатчика одновременной системы цветного телевидения

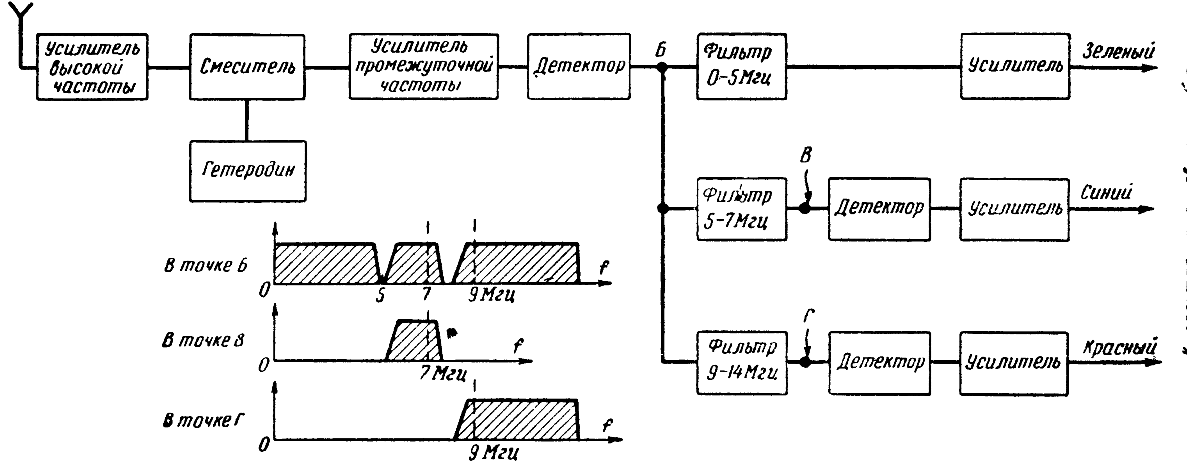


Рис. 26. Блок-схема приемника одновременной системы цветного телевидения.

полосой от 7 до 5,5 *Мгц* и красные сигналы с несущей 9 *Мгц* и верхней боковой полосой от 9 до 14 *Мгц* (рис. 25). Весь спектр колебаний на выходе смесителя занимает полосу от 0 до 14 *Мгц*; этот спектр используется для модуляции радиопередатчика.

Блок-схема приемного устройства изображена на рис. 26. Спектр колебаний на выходе детектора аналогичен частотному спектру на выходе смесителя в передающем устройстве. С выхода детектора сигналы подаются на вход трех фильтров. Первый пропускает колебания с частотами от 0 до 5 *Мгц* (они поступают на управляющий электрод «зеленой» приемной трубки), второй фильтр (полосовой) пропускает колебания с частотами от 5 до

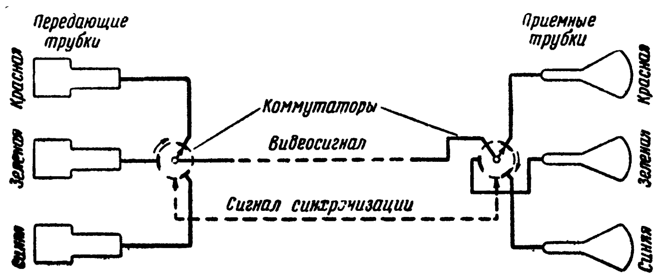


Рис. 27. Блок-схема последовательной системы цветного телевидения с коммутаторами.

7 *Мгц*, третий (также полосовой) — от 9 до 14 *Мгц*. Эти колебания вторично детектируются и модулируют приемные трубки красного и синего каналов.

В основу построения цветной телевизионной системы может быть положен принцип последовательного слагательного смешения цветов. В этом случае необходим только один, канал, связывающий передатчик с приемником, как это следует из схемы, изображенной на рис. 27. В этой схеме использованы те же передающее и приемное устройства, что и на рис. 24, однако они снабжены особыми быстродействующими переключателями (коммутаторами).

Сигналы с выходов передающих трубок камеры последовательно в течение одного кадрового промежутка каждый передаются по линии связи. Один промежуток времени коммутаторы включают «зеленую» передающую трубку в линию, а на приемном конце в это же время подключена «зеленая» приемная трубка. Затем включаются «красные»

трубки, «синие», «зеленые» и т. д. Если все три частных изображения развертываются за общий промежуток времени, не превышающий кадровый период черно-белого телевидения, то последовательно возникающие зеленое, красное и синее изображения будут восприниматься сознанием зрителя одновременно в смешанном виде.

Поскольку общее время передачи всех трех изображений не должно превышать кадровый период черно-белого телевидения, установленный исходя из физиологических свойств зрения, каждый из частных периодов развертки должен быть втрое меньшим, т. е. скорость развертки должна

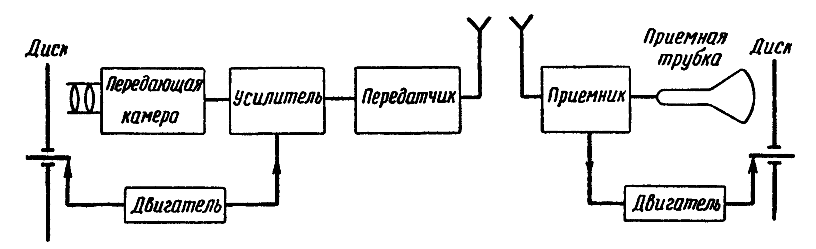


Рис. 28. Блок-схема последовательной системы.

быть увеличена в три раза. При этом полоса частот видеосигналов возрастает в три раза, что, конечно, является существенным недостатком последовательной системы.

В последовательной системе вовсе не нужно использовать трехтрубочные передающее и приемное устройства и переключатели. Практически может работать лишь одна телевизионная установка, аналогичная черно-белому телевидению. Эта система на короткие промежутки времени последовательно превращается в систему передачи и воспроизведения зеленого, красного и синего изображений (рис. 28).

Изменение цветочувствительных свойств системы как на передающей, так и на приемной сторонах осуществляется с помощью непрерывно вращающихся дисков со светофильтрами (рис. 29). На пути световых лучей к передающей трубке и между экраном приемной трубки и наблюдателем последовательно проходят красный, зеленый и синий светофильтры. Разумеется, диски с фильтрами передатчика и приемника вращаются синхронно и синфазно. Спектральная характеристика передающей трубки не имеет неравномерностей в видимой части спектра — трубка приблизительно одинаково чувствительна к излуче-

ниям с различными длинами волн. Цвет свечения экрана приемной трубки—белый. С деталями наиболее распространенной последовательной системы мы познакомимся дальше.

Было предложено много различных систем, сочетающих принципы одновременного и последовательного цветного телевидения. Например, принцип одновременности применялся к передающей камере, а передача осуществлялась последовательно чередующимися цветными строками или чередующимися цветными элементами и т. п. При раз-

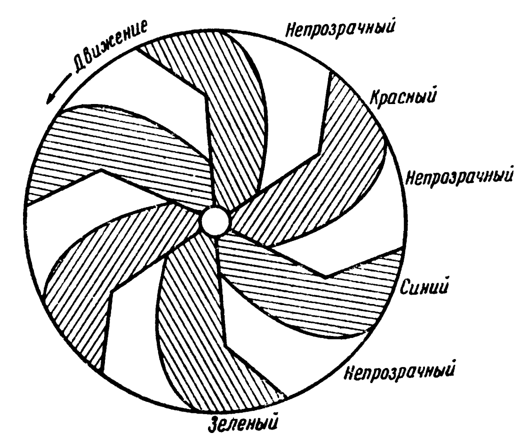


Рис. 29. Устройство диска со светофильтрами.

работках проявлялось желание сочетать практические достоинства, заложенные как в одновременных, так и в последовательных системах.

Основным достоинством одновременных систем является возможность использования свойств глаза для упрощения аппаратуры (сокращения объема передаваемой информации, приводящего к сокращению общей полосы частот). Основным достоинством последовательной системы является наличие только одного канала связи и простота передающего и приемного оконечных устройств.

К системам цветного телевидения вне зависимости от используемых принципов построения в настоящее время предъявляются следующие основные требования:

1. Использование свойств цветового зрения для более рационального построения системы и конструирования аппаратуры, в частности для сокращения полосы частот.

К таким характерным свойствам зрения, помимо упомянутой уже ограниченной разрешающей способности к мелким цветным деталям, относятся также способность глаза не замечать мерцания мелких деталей, воспринимать лишь ограниченное число цветовых оттенков и др.

2. Совместимость с черно-белым телевидением, о которой мы говорили уже во введении, т. е. возможность использования действующих черно-белых приемников для приема бесцветного варианта цветной передачи и желательность использования для цветной передачи радиоканала черно-белого телевидения. Работа в стандартном радиоканале черно-белого телевидения позволяет использовать действующие радиотехнические узлы приемников и передатчиков в цветном телевидении.

3. Эксплуатационная простота и надежность оконечных приборов системы, особенно приемных приборов.

Удовлетворение приведенных требований привело к разработке ряда более совершенных, чем рассмотренные выше, цветных телевизионных систем. Разработаны также универсальные оконечные электронные приборы.

7. ПЕРЕДАЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Наиболее простой и надежной цветной передающей камерой является камера с одной передающей трубкой и вращающимся диском со светофильтрами. Отличие ее от камеры черно-белого телевидения, помимо наличия диска со светофильтрами, состоит в увеличенных втрое частотах разверток. За полный кадровый период осуществляется развертка трех цветных кадров. Так, если общий кадровый период равен $^1/_{25}$ *сек*, то в цветной камере за это время осуществляется три полных вертикальных развертки (при чересстрочной развертке — шесть) и время каждого из частичных циклов составляет $^1/_{75}$ *сек* (при чересстрочной развертке — $^1/_{150}$ *сек*). Если число строк разложения установлено тем же, что и в черно-белом телевидении, то скорость движения пучка по строке возрастает в 3 раза, что приводит к тройному увеличению высшей частоты видеосигнала. Поэтому ширина полосы пропускания предварительного усилителя, установленного в камере, и всех последующих узлов видео- и радиоканала должна быть соответственно увеличена.

Наилучшей передающей трубкой для цветного телевидения является ортикон с переносом изображения, ибо эта трубка наряду с высокой чувствительностью, существенной

при наличии светофильтров, обладает в достаточно широких пределах линейной зависимостью между освещенностью мишени и выходным током.

На рис. 30 приведена фотография цветной телевизионной камеры. Диск со светофильтрами расположен непосредственно у передней поверхности трубки после объектива (диск с объективами снят с оси).

Практические схемы трехтрубочных одновременных камер в деталях оптической системы мало отличаются от

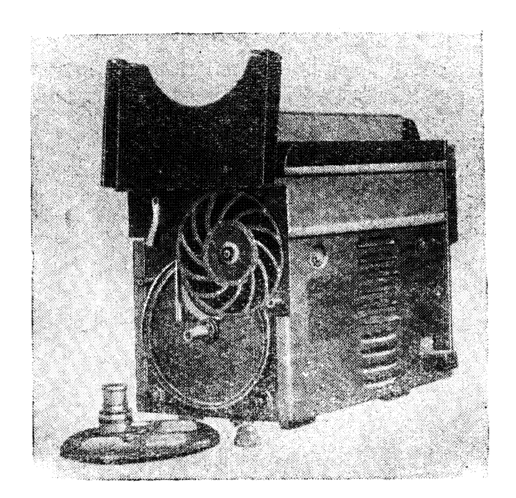


Рис. 30. Внешний вид передающей камеры последовательной системы цветного телевидения.

изображенной на принципиальной схеме (рис. 24) камеры. Используется обычно один объектив, отбрасывающий свет на систему из двух полупрозрачных цветоизбирательных зеркал, установленных под углом 45° к оси и 90° друг к другу. Ближайшее к объективу цветоизбирательное зеркало отражает синюю часть спектра падающего света и пропускает остальные лучи. Синие лучи далее попадают на поверхность обычного зеркала и отражаются на фоточувствительную поверхность «синей» трубки.

После прохождения первого полупрозрачного зеркала прошедшие красно-зеленые лучи попадают на поверхность второго полупрозрачного зеркала, отражающего красные и пропускающего зеленые лучи. Последние попадают непосредственно на поверхность «зеленой» трубки, а красные

лучи — после отражения от обычного зеркала на поверхность «красной» трубки.

Для выравнивания абсолютных величин поглощений фильтров и зеркал на пути световых лучей устанавливаются нейтральные (серые) фильтры. В некоторых конструкциях используются дополнительные корректирующие объективы.

Одновременные трехтрубочные камеры обладают эксплуатационными недостатками. Прежде всего очень трудно добиться во всех трех трубках строгой геометрической идентичности контуров (очертаний) изображений. Перемещения развертывающих лучей в трубках не следует строго линейным законам, что проявляется в геометрических искажениях передаваемой сцены. Глаз легко мирится с подобными искажениями в черно-белом телевидении (если конечно, они не очень велики).

В каждой из трубок развертки по скорости движения в отдельных точках несколько отличаются друг от друга, и поскольку полное изображение получается в результате наложения трех изображений, контуры этих отдельных изображений могут не совпадать. Появится обрамление контуров цветной каймой.

Геометрические искажения могут также появиться из-за относительных погрешностей секций переноса электронов в трубках.

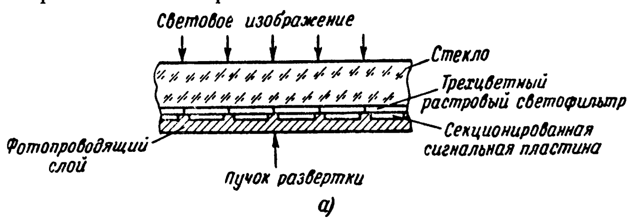
Смещение растров друг относительно друга приводит также к понижению четкости изображения: размеры результирующего элемента становятся бо́льшими, чем размеры элемента растра, обусловленые каждым из развертывающих пучков.

При использовании трех ортиконов с переносом изображения размеры камеры становятся значительно бо́льшими, чем размеры однотрубочных камер. В этом случае необходимо непрерывно осуществлять регулировки растров, а это вносит неудобство в работу оператора. Камеры должны обладать повышенной амортизацией для того, чтобы при перемещении не изменялись регулировки.

В последнее время разработаны специальные трубки с фотосопротивлением (видиконы), обладающие повышенной разрешающей способностью и пригодные для работы в цветном телевидении. Трехтрубочная камера с этими трубками достаточно компактна и мобильна. Однако использование в камере трех передающих трубок связано все же с рядом неудобств, поэтому ведутся разработки

более совершенных приборов. Так, недавно был создан опытный образец трехцветной трубки с фотосопротивлением, позволяющий получить на выходе одновременно три цветовых сигнала.

Все устройство этой трубки заключено в один вакуумный баллон и не требует при работе механических и оптических регулировок и настройки. Размеры трехцветного видикона такие же, как у обычного студийного ортикона с переносом изображения.



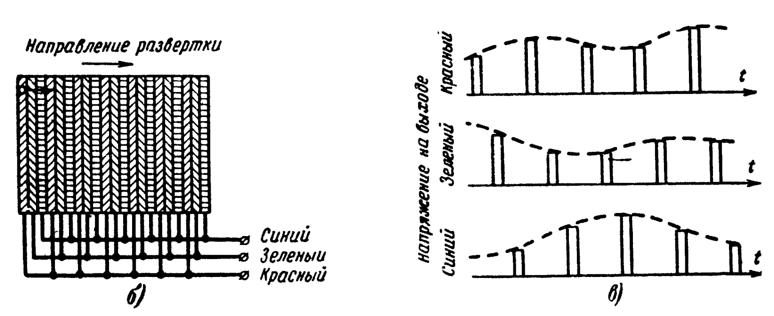


Рис. 31. К пояснению принципа действия и устройства передающей трубки со штриховой мишенью.

Мишень описываемой трубки содержит дополнительный элемент — сложный светофильтр, состоящий из узких чередующихся вертикальных полосок красного, зеленого и синего цветов (рис. 31,*а*). Горизонтальные размеры полосок выбраны такими, чтобы на каждый элемент изображения приходилось не менее одной полоски каждого цвета.

На полоски светофильтров нанесены полупрозрачные проводящие покрытия, образующие сигнальные пластинки. Все полоски полупрозрачных проводящих покрытий, соответствующие одному определенному цвету, соединены между собой и образуют самостоятельную секцию с внешним выводом, изолированным от двух других секций (рис. 31,*б*).

Фотосопротивление нанесено на сигнальные пластинки сплошным слоем, образование видеосигнала происходит так же, как в обычном видиконе, развертка производится пучком медленных электронов.

Поскольку пучок по очереди пересекает участки, покрытые разноцветными полосками светофильтров, в цепях соответствующих сигнальных пластин последовательно появляются импульсы тока, пропорциональные цветовым составляющим светового потока, проектируемого на фотослой. Импульсы разделены паузами, во время которых осуществляется развертка двух других цветных участков (рис. 31,*в*).

Далее сигналы усиливаются в схеме с ограниченной полосой пропускания и вместо последовательности кратковременных импульсов получаются непрерывные видеосигналы, изменяющиеся как огибающая импульсной последовательности (штриховые линии на рис. 31,*в*).

Описанная трехсигнальная трубка, по-видимому, весьма перспективна для практического внедрения благодаря своей эксплуатационной простоте. Однако и здесь имеются серьезные трудности эксплуатационного и технологического характера, на которых необходимо остановиться. Трубка прежде всего страдает существенным практическим недостатком—электрической (реостатно-емкостной) связью между сигнальными цепями.

Элементы сигнальных пластин расположены весьма близко друг к другу, что эквивалентно наличию емкости между отдельными секциями (порядка 1 000 *пф*). Даже если входные нагрузочные сопротивления выбрать малыми (что невыгодно с точки зрения уменьшения влияния флюктуационных помех), то все же будут наблюдаться перекрестные проникновения сигналов из одной секции в другие.

К тому же эффекту приводит наличие активной составляющей проводимости между отдельными полосками сигнальных электродов и перераспределение электронов на мишени в процессе коммутации.

В результате нарушается разделение сигналов и неизбежны искажения цветов передаваемого изображения. Взаимосвязь оказывается столь сильной, что для устранения искажений приходится идти по пути компенсации проникающих сигналов в усилительном тракте. Для этой цели предпринята разработка специальных входных и корректирующих схем.

При изготовлении описываемой трубки, в частности узла мишени, сталкиваются также с существенными трудностями. Ширина отдельных полосок светофильтра и сигнальных пластин должна быть порядка 10—15 *мк*, если желательно обеспечить четкость, принятую в современном телевизионном вещании. Светофильтр должен обладать строго определенными оптическими характеристиками, а сигнальная пластина — еще и электрическими.

Нелегко изготовить растровый светофильтр и сигнальные пластины и установить их должным образом в трубку.

Чувствительность описываемого прибора не может быть большой из-за потерь света в фильтрах, наличия нерабо-

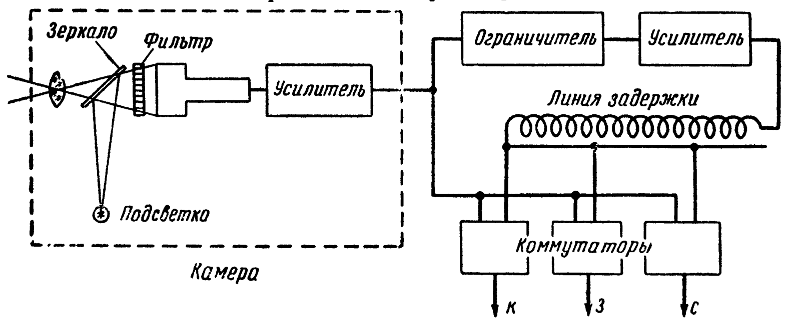


Рис. 32. К пояснению принципа действия трубки со штриховым фильтром.

тающих промежутков фотослоя между полосками сигнальных пластин и потерь в результате компенсации взаимосвязи в усилительном тракте. Разработанный опытный образец трубки имеет 900 полосок, т. е. обеспечивает четкость по горизонтали, соответствующую 300 элементам.

Трудности изготовления штрихового сигнального электрода, секционирования отдельных пластин и совмещения полос фильтра и сигнального электрода отсутствуют в другом приборе — однотрубочной цветной камере с аналогичным штриховым светофильтром, устанавливаемым вне вакуумного баллона перед фотокатодом.

В камере используется обычная одна передающая трубка. Схема камеры приводится на рис. 32. Отличие светофильтра от описанного выше состоит в том, что каждый элемент содержит не три, а четыре полоски — красную, зеленую, синюю и прозрачную. На пути света вблизи фотокатода установлено полупрозрачное зеркало, предназначен-

ное для того, чтобы на фотокатод попадал также свет от специальной лампочки накаливания.

Видеосигнал, снимаемый с нагрузочного сопротивления передающей трубки представляет собой чередование электрических импульсов от прозрачной и цветных полос светофильтра. При этом благодаря подсветке амплитуда импульсов от прозрачных полос всегда будет значительно большей, чем от цветных, при любом характере освещенности передаваемого объекта. После предварительного усиления видеосигнал поступает в блок разделения сигналов, где подается одновременно в четыре электронных схемы: три коммутатора цветных сигналов и двухсторонний ограничитель.

Коммутаторы представляют собой усилительные схемы, запертые до тех пор, пока не вводится специальный отпирающий импульс.

Двусторонний ограничитель построен так, что из сложного видеосигнала путем надлежащим образом выбранного уровня ограничения выделяются только импульсы от прозрачных полос. После усиления эти импульсы подводятся к секционированной линии задержки. Параметры последней выбраны такими, чтобы за время, равное $1/4$ периода развертки одной группы полос, управляющий импульс пробежал одну секцию, где имеется вывод, соединенный с коммутатором зеленого. Под действием импульса усилитель зеленого откроется и пропустит подводимый к его входу видеосигнал.

За следующую четверть периода распространяющийся по линии импульс достигнет второго выхода и отопрет коммутатор синего и т. д. Таким образом на выходах коммутаторов получаются три разделенных сигнала.

В этом приборе наряду с упрощением конструкции оптического узла по сравнению с узлом формирования цветных сигналов в предыдущей трубке возникают дополнительные задачи построения прецизионных коммутаторов. Для получения такой же четкости, как в предыдущей трубке, полоски светофильтра должны быть более узкими, ибо здесь на один элемент изображения приходится не три, а четыре полоски.

В лабораториях разрабатываются более простые — двухрастровые конструкции, аналогичные двум описанным выше. В них светофильтры состоят только из двух цветных чередующихся полосок — красной и синей. Передающая камера, помимо двухрастровой трубки, содержит вторую

передающую трубку, создающую сигналы черно-белого телевидения нормальной четкости.

В приемнике с помощью специальной счетно-решающей (матричной) схемы путем вычитания из сигналов черно-белого изображения сигналов красного и синего изображений формируются сигналы зеленого изображения.

В камере, содержащей две трубки, легче осуществить совмещение изображений, чем в камере, содержащей три трубки. Кроме того, наличие «черно-белой» трубки, создающей четкое изображение, позволяет выполнять двухрастровые трубки со значительно меньшей четкостью, чем потребовалось бы от трехрастровых трубок, описанных

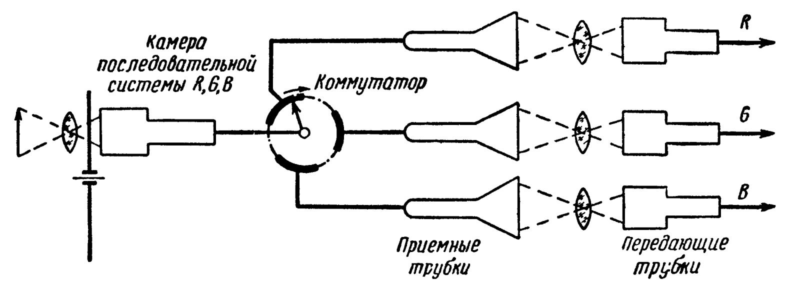


Рис. 33. Блок-схема устройства для перезаписи сигналов последовательной камеры в одновременные сигналы.

выше, что существенно облегчает проблему конструирования подобных трубок.

Возможно, что дальнейшее развитие идей штриховых трубок приведет к созданию надежных практических конструкций.

В практике работы экспериментальных цветных студий применяется иногда своеобразный метод перезаписи телевизионных сигналов — преобразование сигналов последовательной системы цветного телевидения в три непрерывно, одновременно действующих сигнала «красного», «синего» и «зеленого» каналов.

В этой системе выход камеры последовательной системы подключается к электронному переключателю (рис. 33). Последний связан с управляющими электродами трех приемных электронно-лучевых трубок. Особенность экранов этих трубок состоит в несколько большем времени послесвечения, чем период передачи одного цветного поля. Время послесвечения выбрано так, что каждая из трубок сохраняет свечение весь полный кадровый промежуток.

На то время, когда передающая трубка прикрыта красным фильтром, переключатель подключает первую электронно-лучевую трубку, при прохождении синего фильтра — вторую трубку и т. д. Развертка трубок производится с той же скоростью, что и развертка в последовательной системе. За время прохождения «красных» сигналов на экране первой трубки образуется полное изображение с яркостью участков, соответствующей этим сигналам.

Затем электронный пучок первой трубки запирается до следующего цикла прохождения красного фильтра, т. е. пауза длится $^2/_3$ времени развертки полного цветного кадра. Во время паузы в развертке на экране трубки сохраняется изображение.

Аналогично работают две другие трубки: на экране второй трубки образуется изображение, соответствующее «синим», а третьей — «зеленым» сигналам. Начала циклов разверток в этих трубках соответственно сдвинуты во времени на одну и на две трети периода развертки цветного кадра.

Против экрана каждой из приемных трубок расположена передающая трубка. Эти трубки преобразуют световые изображения на экранах приемных трубок в видеосигналы. Скорости разверток в передающих трубках втрое меньше, чем в приемных трубках. По окончании каждого цикла развертки начинается следующий цикл. Развертки в трубках производятся синхронно и синфазно. Таким образом, на выходах передающих трубок получаются сигналы, как бы растянутые на втрое большие промежутки времени.

Аппаратура перезаписи расположена в аппаратной, а оператор, ведущий передачу, управляет достаточно портативной и надежной однотрубочной камерой последовательной системы. Недостатком системы перезаписи является некоторое уменьшение четкости изображения, связанное с дополнительными оптическими и электрическими преобразованиями.

В студиях американской компании Дюмонт и в лаборатории телевидения Ленинградского электротехнического института связи проводились успешные опыты цветной передачи с помощью «бегущего луча». Источником освещения объекта передачи в этом случае является весьма яркое световое пятно на экране особой проекционной электронно-лучевой трубки с малым послесвечением. Пятно перемещается по экрану, совершая обычный путь развертки.

С помощью оптической системы световой поток от экрана трубки проектируется на объект передачи и последовательно, элемент за элементом освещает поверхность сцены.

Свет, рассеиваемый объектом, попадает на группы фотоэлементов, установленных в студии примерно в тех местах, где располагают источники света при обычной передаче с камерой. Каждая группа состоит, по крайней мере, из трех фотоэлементов, прикрытых соответственно красным, зеленым и синим фильтрами. Фотоэлементы снабжены электронными умножителями.

Для того чтобы в каждый момент времени освещался только один единственный элемент объекта, во время передачи в студии не должно быть никаких других (кроме электронно-лучевой трубки) источников освещения. Работа в темноте, естественно, затруднительна для исполнителей и обслуживающего персонала. Поэтому общее освещение студии производится импульсными источниками света, включаемыми на малые промежутки времени прохождения кадровых гасящих импульсов.

Достоинства описанного метода передачи состоят в отсутствии трех одновременно действующих передающих трубок и связанных с ними трудоемких регулировок. Однако недостатки метода — малая чувствительность и «светобоязнь» — не позволят его широко использовать, в частности, этот метод совершенно непригоден для внестудийных передач.

8. ПРИЕМНЫЕ ТРУБКИ

Перейдем к обзору оконечных приемных устройств, применяемых в современных системах цветного телевидения. Упомянутые ранее устройства для наблюдения цветных телевизионных изображений как одновременные (рис. 21), так и последовательные обладают рядом недостатков.

В устройстве последовательной системы, содержащей одну обычную трубку с белым экраном, при больших размерах последнего, размеры диска со светофильтрами становятся столь большими, что приемное устройство получается весьма громоздким; наличие вращающегося диска также нельзя считать удобным в домашней эксплуатации. Светофильтры приводят к существенным световым потерям.

Было предложено несколько улучшенных оконечных устройств для последовательного цветного телевидения.

Одно из них (рис. 34,*а*) содержит вместо диска вращающуюся эластичную ленту со светофильтрами, окружающую трубку; при этом размеры приемника намного сокращаются.

В другом устройстве на экране одной приемной трубки создаются три телевизионных растра. Верхняя треть поверхности экрана покрыта зеленым, средняя — красным и нижняя — синим люминофором (рис. 34,*б*). Развертка осуществляется единственным электронным пучком, который по окончании прочерчивания растра на зеленом люминофоре переходит на красный и т. д. С помощью трех проек-

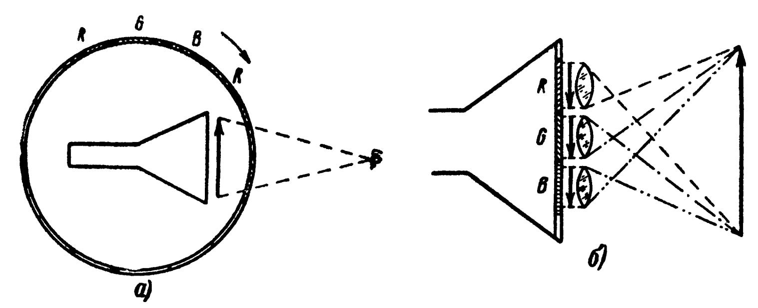


Рис. 34. Схематическое изображение оконечных устройств цветного приемника.

ционных объективов изображения совмещаются на одном светорассеивающем экране.

Эту систему также нельзя признать удачной, хотя отсутствие светофильтров и является ее достоинством. Оптическая система трубки весьма точна и потому довольно дорога. В трубке трудно обеспечить идентичность трех цветных кадров (нелинейность пилообразных отклонений различна в разных частях поверхности экрана). Кроме того, трубка должна обладать втрое большей разрешающей способностью (на поверхности экрана укладываются три полных растра). Эта трубка не получила распространения.

Недостатки трехтрубочных одновременных устройств связаны с требуемыми высокими точностями совмещения растров и их идентичностью. Устройства получаются весьма дорогими и мало удобными в эксплуатации.

В связи с этим появилось много идей создания трехрастровых универсальных цветных трубок, свободных от многих перечисленных недостатков; в таких трубках на-

блюдение цветного изображения производится непосредственно на экране без применения оптических систем или светофильтров. Смешение цветов может быть пространственное, одновременное или последовательное в зависимости от системы, в которой используется трубка. Мы опишем несколько подобных трубок, получивших практическое распространение.

Трехпушечная трубка с теневой маской, изображенная на рис. 35,*а*, содержит сложный мелкоструктурный трехрастровый экран, структура которого состоит из чередующихся точечных покрытий цветных люминофоров, вплотную примыкающих друг к другу (рис. 35,*б*). Каждый полный элемент цветного изображения содержит три разноцветных элемента (красный, синий и зеленый), регулярно чередующихся на поверхности.

Перед экраном параллельно его поверхности установлена тонкая металлическая пластина с большим числом круглых отверстий (теневая маска). Центр каждого отверстия приходится против центра равностороннего треугольника, в вершинах которого расположены точечные люминофорные покрытия красного, синего и зеленого цветов. В узкой горловине симметрично относительно оси трубки установлены три электронных пушки. Последние установлены так, что оси бомбардирующих пучков пересекаются в плоскости теневой маски, затем между маской и экраном пучки снова расходятся.

Если провести прямую, совпадающую с осью одного из пучков, через центр любого отверстия в маске, то эта прямая обязательно пройдет через люминофорную точку только одного какого-нибудь цвета. Для данного пучка при любом его отклонении элементы двух других цветов всегда будут прикрыты маской.

Иными словами, каждый из пучков, скользя в любом направлении по поверхности экрана, бомбардирует отдельные, только свои участки, не совпадающие с участками, бомбардируемыми двумя другими пучками. Ось второй пушки, направленная через любое отверстие, проходит только через точечные покрытия второго цвета. Третья пушка может бомбардировать только элементы люминофора третьего цвета (другие цветные элементы при перемещении пучка защищены от бомбардировки теневой маской).

Отклонение всех трех пучков осуществляется одной отклоняющей системой (катушки помещаются на горлови-

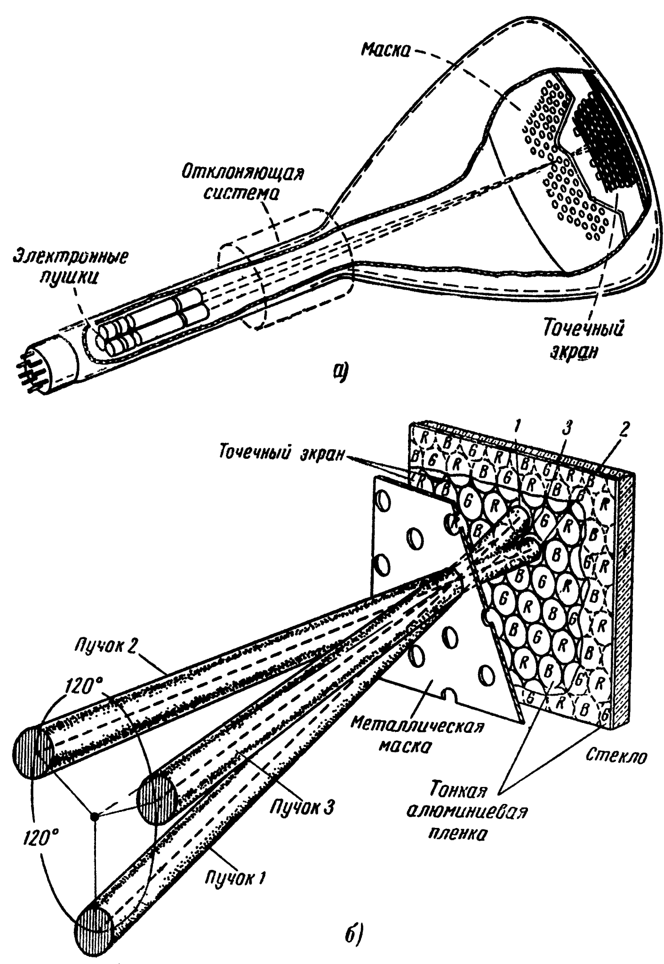


Рис. 35. К пояснению устройства приемной трубки с теневой маской.

ну обычным путем). Это является существенным, решающим достоинством трубки.

В изготовленных по этому принципу трубках число элементов растра достаточно велико. Так, в одной из них с диаметром экрана ~50 *см* (21AXP22) в металлической маске толщиной ~0,25 *мм* имеется около 300 000 отверстий. С нормального расстояния рассматривания точечная структура изображения мало заметна.

Девятьсот тысяч элементов люминофоров нанесены непосредственно на внутреннюю поверхность переднего стекла. Люминофорный слой покрыт со стороны, обращенной к электронным пушкам, тонкой алюминиевой пленкой, улучшающей электрические и светотехнические свойства трубки.

Конструкция трубки — металло-стеклянная; металлический конус экранирует внутренний объем от действия внешних магнитных полей, в частности от поля земного

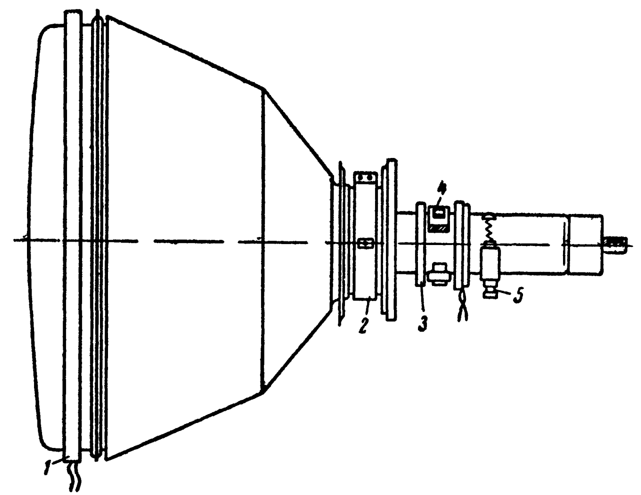


Рис. 36. Схематическое изображение трубки с теневой маской с внешними приспособлениями.

1 — компенсирующая катушка; *2* — отклоняющая система; *3* — ферритовый экран; *4* — катушки сходимости; *5* — магнит установки синего.

магнетизма. В этой трубке от точности взаимного расположения электронных пучков и положения пучков относительно маски резко зависит качество изображения, поэтому защита от внешних магнитных полей приобретает существенное значение.

Поскольку вблизи передней поверхности колбы электроны в некоторой мере подвержены влиянию электрических и магнитных полей, на внешней периферии трубки по окружности располагают несколько небольших постоянных магнитов (или специальные катушки), компенсирующих действие полей (рис. 36). Напряженность и направление полей регулируют при установке приемника.

При эксплуатации трубки возникает необходимость еще в некоторых регулировках.

Мы указывали, что сходимость электронных пучков в плоскости маски и симметрия пучков относительно оси трубки обеспечиваются соответствующими расположением и наклоном осей электронных пушек. В процессе сборки трубки неизбежны малые отклонения деталей от необходимых положений, поэтому в трубке предусмотрена возможность точной установки электронных пучков с помощью электрических средств.

Далее, если обеспечена сходимость пучков в центре экрана, то при отклонении пучков, в процессе развертки,

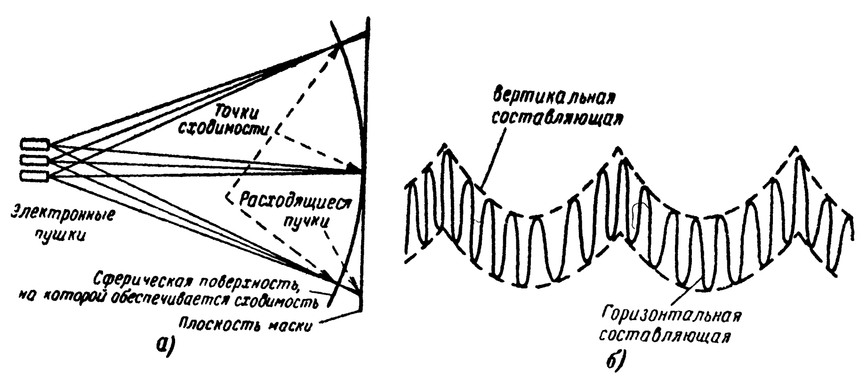


Рис. 37. Расхождение пучков при удалении от центра экрана (*а*) и форма корректирующих токов (*б*).

сходимость нарушается хотя бы по той причине, что поверхность маски является не сферической, а плоской (рис. 37). Поэтому необходимо систематически производить изменение сходимости, зависящее от положения пятна на экране, т. е. осуществлять поправку, величина которой зависит от мгновенных значений развертывающих напряжений (токов).

Для этой цели трубка снабжена электромагнитным устройством динамической сходимости. Последнее состоит из трех электромагнитов с полюсными наконечниками (рис. 38). Обмотки магнитов и части сердечников помещаются снаружи на горловину трубки (рис. 36). Окончания полюсных наконечников смонтированы непосредственно в электронных пушках внутри горловины. Магнитные силовые линии между этими наконечниками направлены перпендикулярно радиусам (рис. 38,*б*) и потому изменение напряженности поля заставит соответствующий

электронный пучок переместиться в радиальном направлении.

Меняя постоянную составляющую токов подмагничивания, можно надлежащим образом установить пучки. Однако для этого все три пучка должны быть на одинаковом угловом расстоянии друг от друга (120)°. Последнее условие может не выполняться; для его осуществления один из

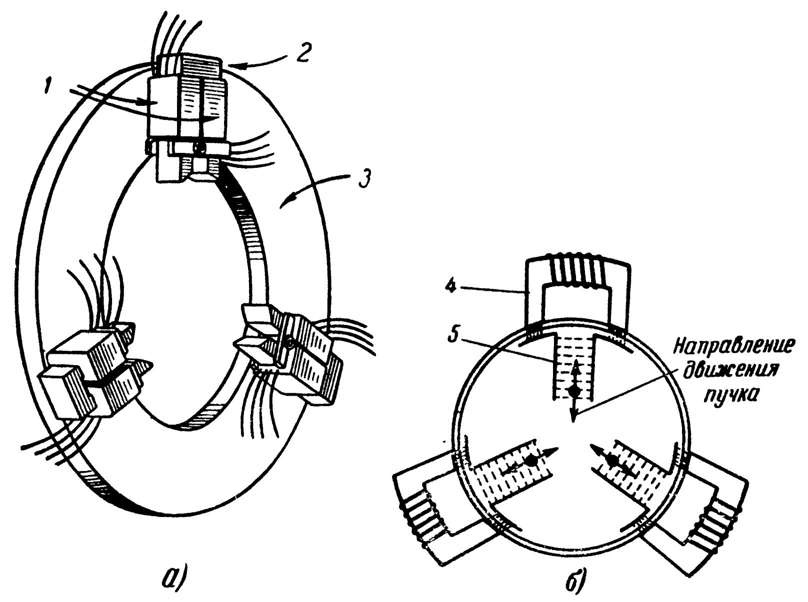


Рис. 38. Устройство динамической сходимости (*а*) и форма магнитных полей (*б*).

1 — обмотки; 2 — сердечник; 3 — ферритовый экран; 4 — внешний магнит; 5 — внутренние полосы

пучков должен иметь возможность перемещаться еще в боковом направлении. Это осуществляется с помощью особого постоянного магнита, также помещаемого на горловину (рис. 36 и 39).

Полюсные наконечники магнита бокового перемещения одного из пучков находятся внутри трубки; конфигурация наконечников такова, что создаваемые ими радиальные силовые линии пронизывают пространство только одного из пучков (рис. 39,*б*), обычно «синего». При вращении винта (рис. 39,*а*) изменяется напряженность поля, и «синий» пучок перемещается в боковом направлении.

Обмотки электромагнитов устройства динамической сходимости питаются пульсирующими токами сложной формы (рис. 37,*б*). Этот ток является суммой постоянной составляющей, необходимой для правильной установки неподвижного пятна, переменного тока с частотой вертикальной развертки и тока со строчной частотой. Форма переменных токов, необходимая для правки сходимости, близка к параболической [1].

Параболические переменные токи формируются специальной схемой в приемнике так называемым усилителем

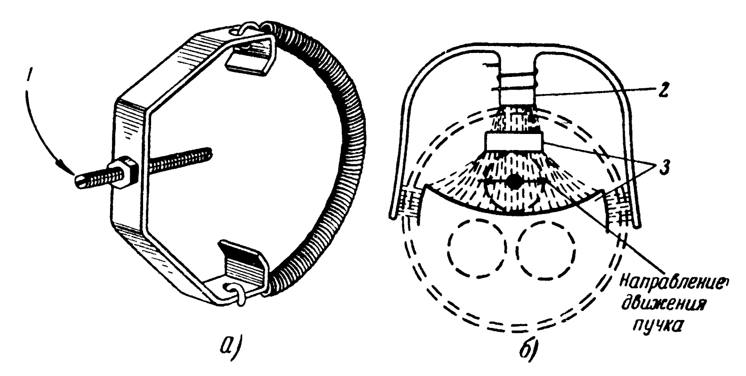


Рис. 39. Магнит боковой установки синего цвета (*а*) и форма магнитного поля (*б*).

1 — установочный винт; *2* — внешний магнит; *3* — внутренние полосы.

динамической сходимости. Схема состоит из трех идентичных узлов, один из которых показан на рис. 40.

Каждый из узлов этой схемы содержит два триода ($Л_1$ и $Л_2$). На сетку лампы $Л_1$ подается импульс с частотой горизонтальной развертки, получаемый на специальной обмотке выходного трансформатора горизонтальной развертки. Этот импульс одновременно подводится к трем идентичным потенциометрам $П_1$, один из которых показан на схеме рис. 40. Далее импульс анодного тока лампы $Л_1$ ударно возбуждает колебательный контур $L_R C_R$, настраиваемый на частоту горизонтальной развертки.

Индуктивность контура L_R является одной из обмоток электромагнита динамической сходимости, изображенного

---

[1] Для правки сходимости в горизонтальном направлении параболическая форма кривой может быть заменена отрезком косинусоиды.

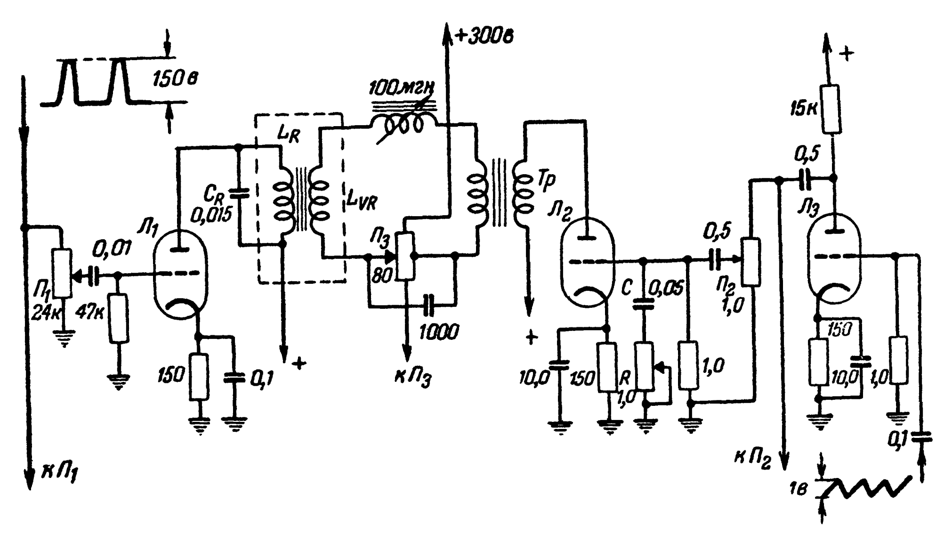


Рис. 40. Схема усилителя сигналов динамической сходимости.

на рис. 38 (электромагнит на схеме рис. 40 обведен пунктиром).

Напряжение приблизительно пилообразной формы с частотой вертикальной развертки подается с катодной нагрузки выходной лампы вертикальной развертки на сетку усилительной лампы $Л_3$. Усиленное напряжение подводится параллельно к трем потенциометрам $П_2$, один из которых показан на схеме.

Снимаемое с потенциометра напряжение с помощью интегрирующей цепочки RC преобразуется в напряжение приблизительно параболической формы и далее усиливается лампой $Л_2$, нагрузкой которой является трансформатор $Тр$. Вторичная обмотка трансформатора подключена через дроссель с переменной индуктивностью к обмотке электромагнита L_{VR}. С помощью дросселя регулируется фаза колебания.

В цепь электромагнита с помощью низкоомного потенциометра $П_3$ вводится постоянная составляющая тока, величина которой устанавливается по правильной сходимости неподвижного пятна.

В двух остальных узлах, не показанных на схеме, имеются аналогичные потенциометры, лампы, катушки и т. д. Данная схема содержит 7 ламп; иногда применяются схемы с использованием лишь четырех триодов.

При использовании трубки в одновременных системах цветного телевидения управляющие электроды пушек подключаются независимо к выходам «красного», «синего» и «зеленого» каналов приемника. Отклонение всех трех пучков производится одновременно, а яркости цветных элементов меняются независимо друг от друга и зависят только от напряжений на соответствующих управляющих электродах. Цвет данного элемента изображения зависит от относительных величин яркостей красного, синего и зеленого пятен, образующих в совокупности этот элемент.

При использовании трубки в последовательной системе два из трех пучков попеременно заперты. Развертка производится поочередно: сначала один из пучков, например бомбардирующий красные точки, прочерчивает весь красный точечный растр, затем этот пучок на два кадровых промежутка времени запирается и начинается развертка «зеленым» пучком, после этого — «синим» и т. д. Выход приемника подключен одновременно ко всем трем управляющим электродам, а запирание двух пучков производится в цепях катодов специальной электронной схемой. Сме-

шение цветов в этом случае также пространственное, но последовательное.

Однопушечная трубка с теневой маской является разновидностью трехпушечной. Экран и теневая маска этой трубки устроены так же, как и в предыдущей. Бомбардировка осуществляется одной единственной электронной пушкой, ось которой совпадает с осью трубки.

Траектория электронов, вылетающих из этой пушки, своеобразна. На небольшом участке вблизи пушки траекто-

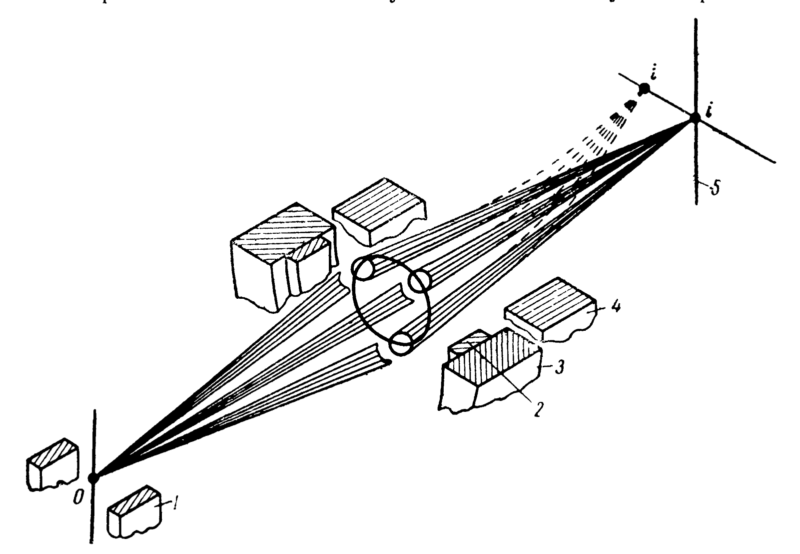


Рис. 41. Траектория электронов в однопушечной трубке с теневой маской.

1 — катушки вращательного движения; *2* — катушки динамической сходимости; *3* — катушки сходимости; *4* — отклоняющие катушки; *5* — плоскость маски.

рия электронов совпадает с осью, затем, начиная от точки O (рис. 41), электроны отклоняются от оси и некоторое расстояние проходят под углом к ней. Дойдя до центра особой отклоняющей системы, электроны снова меняют направление и склоняются обратно к оси, пересекая ее в плоскости теневой маски в точке i (или i'). Далее электроны попадают на экран.

Помимо описанного наклонного движения, весь электронный пучок с помощью специальной отклоняющей системы непрерывно и очень быстро в р а щ а е т с я в плоскости, перпендикулярной оси. В любом из положений пучка

он пересекает плоскость маски под одним и тем же углом, таким же, как угол вхождения в маску электронов в трехпушечной трубке.

Наклон электронов и сообщение пучку вращательного движения в этой трубке заменяют трехпушечную систему предыдущей трубки. Однако для полной идентичности электронный пучок нужно запирать во всех положениях, за исключением тех, когда бомбардируются участки, покрытые только одним каким-нибудь цветным люминофором. В промежуточных положениях будут бомбардироваться люминофоры двух и даже трех разных цветов, что, конечно, приведет к цветовым искажениям. Промежутки времени, когда поверхность свечения электронного пучка точно совпадает с люминофорным пятном одного цвета, чрезвычайно малы (при мгновенном облучении мала и яркость свечения). Для увеличения последней диаметр электронного пучка должен быть несколько меньше диаметров люминофорных «точек».

Таким образом, в однопушечной трубке облучение каждого цветного элемента производится последовательно.

Помимо описанных движений, пучок обычным образом совершает развертку вдоль строк кадра. Движущийся в горизонтальном направлении пучок за малое время проникновения через отверстие в маске успевает в соответствии с дополнительным вращательным движением последовательно (прерывисто) облучать красный, зеленый и синий участки экрана. Затем электроны попадают на непрозрачный участок маски и вскоре вновь встречают отверстие и т. д.

Приемное устройство с такой трубкой должно быть снабжено быстродействующей электронной схемой для подключения в нужные моменты времени соответствующих «цветных» видеосигналов к управляющему электроду трубки. Наличие большого числа дополнительных регулируемых отклоняющих систем делает эксплуатацию этой трубки неудобной.

Однопушечная трубка с проволочными сетками (рис. 42,*а*) является более удачной конструкцией. Экран этой трубки покрыт узкими вертикальными полосками люминофоров, чередующимися в следующей последовательности: красная, зеленая, синяя, зеленая, красная, зеленая, синяя и т. д., т. е. слева от каждой зеленой полоски находится красная, а справа синяя полоски.

Параллельно экрану на достаточно близком расстоянии

от него расположена решетка из тонких вертикальных проволок. Последние установлены против синих и красных полосок, а зеленые полоски для бомбардирующего пучка остаются открытыми. Все проволоки, прикрывающие красные полоски, ниже кадровой рамки припаяны к металлическому выводному стержню. Другой стержень электрически соединяет все проволоки, прикрывающие синие полоски.

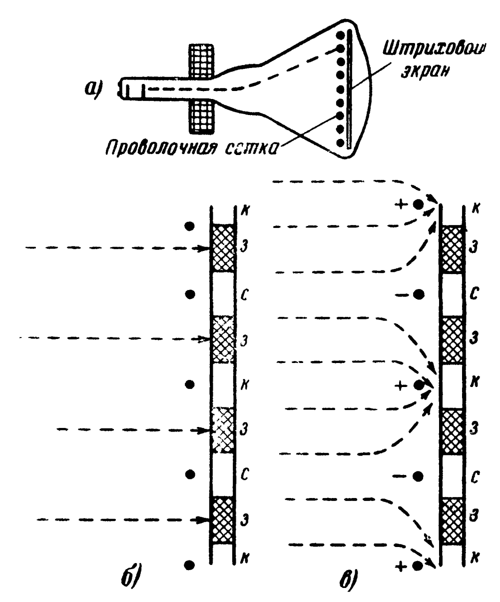


Рис. 42. К пояснению устройства и принципа действия приемной трубки с проволочными сетками.

Если к стержням не подведено напряжение, то при движении электронного пучка вдоль строк кадра экран светится зеленым светом (рис. 42,*б*). Структура растра — точечная, ибо между зелеными точками будут в этом случае темные промежутки, соответствующие красным и синим полоскам. Число полосок каждого цвета достаточно велико, чтобы с нормального расстояния рассматривания точечная структура была незаметной.

Если к «красным» проводникам подведено положительное напряжение (относительно «зеленых» проводников), то траектория бомбардирующих электронов в пространстве между сеткой и экраном изменится и при надлежащей ве-

личине напряжения все электроны попадут на красные полоски (рис. 42,*в*). Подав положительное постоянное напряжение на «красную» сетку, при развертке получим красное (точечное) свечение экрана. Если подать положительное напряжение на «синюю» сетку, то экран будет светиться синим цветом.

При работе описываемой трубки в последовательной системе цветного телевидения напряжение между сетками меняется с низкой частотой, т. е. с частотой цветных кадров (или полукадров). Когда происходит развертка зеленого кадра и на управляющем электроде действуют «зеленые» сигналы, разность потенциалов между сетками равна нулю. При развертке красного кадра на «красной» сетке положительное напряжение, при прохождении синего изображения полярность напряжения между сетками меняется на обратную и т. д.

При использовании трубки в одновременных системах, между сетками действует высокочастотное напряжение. Частота последнего подобрана так, чтобы за время движения между двумя соседними зелеными полосками пучок успел сместиться влево и вправо. Выходные сигналы трех цветных каналов подключены к электронному переключателю, и в тот малый промежуток времени, когда электроны бомбардируют красный люминофор, подключается «красный» канал, на промежутки времени бомбардировки зеленых полосок подключаются «зеленые» сигналы и т. д. В промежуточных положениях пучок запирается.

Достоинством описываемой трубки является наличие одной обычной отклоняющей системы, одного электронного пучка и электростатической системы коммутации цветов. Однако процесс коммутации связан с примененинем сложных электронных схем, ибо сетки обладают большой емкостью. Поскольку частота переключений велика (для поэлементной смены цветов — порядка 10 *Мгц*), а напряжение смещений достигает нескольких сотен вольт, схемы оконечных каскадов коммутатора получаются очень громоздкими и дорогостоящими.

Трубки со штриховым экраном. Ведутся работы по созданию приемных трубок со штриховыми экранами и автоматическим получением импульса, определяющего положение электронного пучка на экране; импульсы управляют электронным коммутатором видеосигналов.

В таких трубках, помимо штрихового экрана, нет никаких особых приспособлений для коммутации пучка. Экран со-

стоит из четырех групп чередующихся узких вертикальных полосок: красной, синей, зеленой и сигнальной. Сигнальная полоска изготавливается из материала, коэффициент вторичной электронной эмиссии которого существенно отличается от аналогичного коэффициента люминофорных цветных полосок.

При движении электронного пучка в горизонтальном направлении ток в цепи ускоряющего электрода трубки будет резко изменяться каждый раз, когда пучок будет пересекать сигнальную полоску. Это изменение тока и создает импульс, свидетельствующий об относительном положении электронного пучка; импульс управляет переключателем каналов.

Если последовательность полосок такова, что после сигнальной полоски следует красная, затем зеленая, а затем синяя, то задним фронтом сигнального импульса откроется схема, подключающая на необходимый промежуток времени «красный» видеосигнал к управляющему электроду трубки, затем «зеленый», а затем и «синий» сигналы. Таким образом изменение скорости развертки или неравномерность нанесения полосок по поверхности экрана не приведет к ошибкам в цветовоспроизведении.

В некоторых разрабатываемых конструкциях описанный принцип осуществляется несколько иначе. Так, в одной из конструкций на стеклянную поверхность трубки наносятся только три сорта люминофорных полосок. Люминофорный слой покрывается тонкой алюминиевой пленкой, которая, как известно, улучшает свойства трубки. На алюминиевую пленку с внешней стороны наносится узкая штриховая полоска, совпадающая по положению с одной из групп цветных полосок, например с красной. Эта внешняя полоска представляет собой тончайшую пленку, изготовленную из материала с особым значением коэффициента вторичной электронной эмиссии. Электронная пушка создает два параллельных пучка, отклоняемых одной системой. Один из пучков обычным путем пробивает алюминиевую пленку и возбуждает люминофоры. Плотность этого пучка модулируется попеременно тремя видеосигналами. Второй немодулированный пучок, ток которого значительно меньше, не возбуждает люминофоры, а служит только для получения управляющего импульса в цепи ускоряющего электрода. Эта конструкция, конечно, значительно сложнее первой.

Трубки со штриховыми экранами являются простыми и

перспективными конструкциями. Промышленных образцов таких трубок пока еще нет.

В лабораториях разрабатываются также трубки со сплошными многослойными люминофорными покрытиями. Изменение цвета свечения в подобных приборах может осуществляться за счет изменения скорости бомбардирующих электронов и плотности пучка. Для изменения скорости между цветными люминофорами можно располагать прозрачные токопроводящие пленки или сетки, на которые подают необходимые напряжения.

В заключение нужно заметить, что использование однопушечных трубок в одновременных системах связано, в конечном итоге, с преобразованием трех одновременно действующих сигналов в один сигнал, в котором быстро чередуются цвета, т. е. в сущности здесь имеется переход к системе с поэлементной сменой цветов. Это означает, что каждый из цветных каналов используется неполностью, а только, по крайней мере, одну треть полезного времени передачи.

Глава третья

СИСТЕМЫ ЦВЕТНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

Из большого числа разрабатывавшихся систем цветного телевидения мы рассмотрим только некоторые.

Две системы относятся к классу одновременных систем и в них выполняются требования совместимости. В этих системах могут использоваться все трехрастровые оконечные устройства, описанные в предыдущей главе. Приведенный нами обзор показывает, что в настоящее время не разработаны еще оконечные приборы, обладающие эксплуатационной простотой и надежностью, сравнимыми с приборами черно-белого телевидения.

Так, например, обилие регулировочных приспособлений и схем, необходимых для нормальной работы трехпушечной трубки с теневой маской, выпускаемой уже промышленностью, усложняет конструкцию и удорожает приемники.

Вместе с тем при выборе системы для целей вещания несомненные преимущества одновременных, совместных систем становятся решающими.

Третья из описываемых систем, которую мы рассмотрим ранее других, — последовательная со сменой цветов по полям. В этой системе при ее практическом осуществлении

удалось добиться известных усовершенствований и упрощений. Поэтому в ряде стран, в том числе и в Советском Союзе, производилась опытная эксплуатация последовательной системы.

Бесперспективность последовательной системы в направлении удовлетворения требований совместимости, а также достаточная конструктивная и эксплуатационная сложность приемных устройств, наглядно выявившаяся при опытной эксплуатации, не позволяют внедрять эти системы для целей вещания. Однако последовательная система находит применение в прикладном телевидении. Кроме того, некоторые идеи последовательной системы используются при разработке новых совместимых систем цветного телевидения — так называемых смешанных систем.

9. СИСТЕМА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СМЕНОЙ ЦВЕТОВ ПО ПОЛЯМ

Принцип действия рассматриваемой системы был уже описан (он поясняется схемой на рис. 28). Последовательная смена изображений в основных цветах для получения эффекта смешения осуществляется практически в этой системе каждый полукадровый период; каждое последующее поле (совокупность четных или нечетных строк) передается в другом цвете. Таким образом, полный кадр образуется как результат наблюдения шести полей, отличающихя друг от друга либо цветом, либо развертываемыми строками, по нижеследующей схеме:

Поле № 1	Красное, нечетные строки
Поле № 2	Синее, четные строки
Поле № 3	Зеленое, нечетные строки
Поле № 4	Красное, четные строки
Поле № 5	Синее, нечетные строки
Поле № 6	Зеленое, четные строки

Затем цикл повторяется снова.

Таким образом, развертка по четным строкам при передаче, например, красного изображения не следует непосредственно за разверткой по нечетным строкам красного, а отодвигается на время, пока будут частично переданы синие и зеленые элементы. Развертка по четным строкам следует за разверткой по нечетным строкам, но в другом цвете.

При такой последовательности смен цветных полей сокращаются промежутки времени между появлением по-

лей одного цвета. Между полями одного цвета, отличающимися друг от друга только мелкими деталями изображения, существует временно́й промежуток, равный двум полукадровым периодам. Если производить развертку каждого цветного кадра сначала по нечетным строкам, а затем по четным в том же цвете, то между одноцветными полями существовал бы временно́й промежуток в четыре полукадровых периода.

Подобная смена полей значительно уменьшает мерцание изображения (в крупных деталях) и улучшает условия психологического смешения цветов. Рассматривая ранее принципы последовательной системы, мы говорили о необходимости увеличения втрое скорости развертки, с тем чтобы время передачи всего полного цветного кадра не превышало кадровый период черно-белого телевидения. К сказанному нужно добавить, что эффект мерцания разноцветных полей более неприятен, чем одноцветных, и если не увеличить скорость развертки до нужного предела, то наблюдение изображений, особенно с большими яркостями, становится утомительным.

Сказанное справедливо не только для случая передачи объектов, цвет которых, к примеру, совпадает с одним из основных цветов приемника, когда промежуток времени между возникновениями очередных свечений экрана велик, ибо два цвета отсутствуют, но также и для случаев передачи цветов, ощущаемых как результат смешения. Характерным примером является передача цветностей, образуемых примерно равноинтенсивным свечением экрана во всех полях. Казалось бы, в этих случаях между началами соседних полей может существовать временно́й промежуток в $^1/_{50}$ *сек*, как в черно-белом телевидении. Однако это не так; равноинтенсивные свечения основных цветов ощущаются глазом в соответствии со спектральной характеристикой последнего с разной яркостью. Поэтому и в данном случае, если промежуток между полями с одинаковой яркостью не будет в пределах $^1/_{50}$ *сек*, зритель ощутит неприятное мерцающее изменение оттенков белого цвета. Поля с равной яркостью свечения следуют, как правило, через два на третье, т. е. промежуток развертки каждого поля должен составлять $^1/_{150}$ *сек* и время полного цветного кадра должно быть $^6/_{150}$ *сек*.

Конструкторам систем с последовательной сменой цветов по полям приходится компромиссно решать важный технический вопрос уменьшения ширины полосы пропу-

скания канала связи при обеспечении надлежащего качества. Если подсчитать высшую частоту сигнала цветного телевидения в рассматриваемой системе, то в связи с увеличением втрое скорости развертки высшая частота (при чересстрочной развертке) составит около 18 *Мгц*. Если желательно уложиться в полосу пропускания, отведенную для черно-белого телевидения (приблизительно 6 *Мгц*), то пришлось бы сократить число строк разложения с 600 до 340.

Столь большое сокращение числа строк разложения значительно снижает четкость изображения. Правда, наличие цвета в известной мере восполняет уменьшение числа строк; уменьшение распознаваемости мелких деталей за счет снижения числа строк компенсируется увеличением распознаваемости за счет окраски.

Обычно число строк разложения при разработке подобных систем выбирают равным примерно 80% числа строк разложения действующего черно-белого телевидения, т. е. в нашей стране около 500. В этом случае необходима полоса пропускания порядка 12,5 *Мгц*. Однако полосу пропускания ограничивают примерно до 9 *Мгц*. При этом зона размытости в горизонтальном направлении увеличивается и становится несколько больше средней зоны размытости в вертикальном направлении, т. е. получается несоответствие между вертикальной и горизонтальной четкостями изображения.

Горизонтальную четкость искусственно увеличивают с помощью особых методов. Одним из таких методов является точечное разложение или, иначе, создание перемежающейся развертки в горизонтальном направлении.

Сокращение полосы частот при неизменной четкости (или увеличение четкости при неизменной полосе частот), получающееся при точечном разложении, принципиально возникает за счет увеличения времени передачи всего объема информации. Здесь, также как и при чересстрочном разложении, увеличивается вдвое время передачи полного кадра без появления заметного мерцания.

Принцип точечного разложения поясним на примере развертки черно-белого изображения. В отличие от непрерывного движения по горизонтали, с которым мы встречались до сих пор, при точечном разложении развертка по горизонтали производится прерывисто. Засвечиваемые элементы экрана чередуются с участками таких же раз-

меров, остающихся при данном ходе пучка незатронутыми В приемной трубке это легко осуществить, подавая периодически между катодом и управляющим электродом трубки, помимо видеосигнала, запирающие прямоугольные импульсы напряжения.

При следующем ходе пучка по этой же строке положение засвеченных и незатронутых участков меняется, те

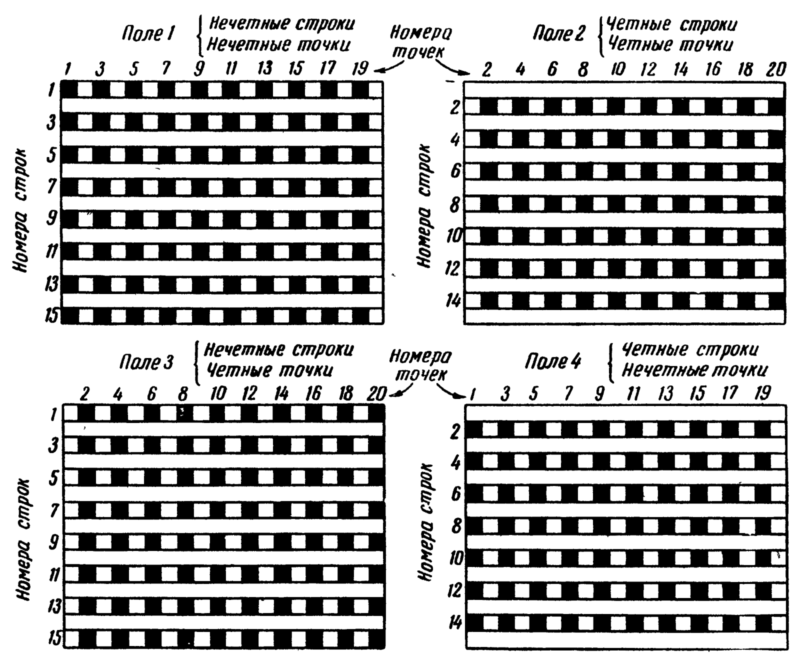


Рис. 43. Порядок развертки при чересточечном и чересстрочном разложении в черно-белом телевидении.

участки, которые за предыдущий ход оставались темными, сейчас засвечиваются, а светящиеся от предыдущего хода пучка элементы не облучаются. Все элементы данной строки развертываются за два горизонтальных хода. Таким образом полный цикл развертки всего кадра при чересстрочном и чересточечном разложении складывается из четырех полей, как это показано на рис. 43.

Если время разложения каждого поля остается равным, как и прежде, $^1/_{50}$ *сек*, то общее время передачи всего кадра составляет теперь $^4/_{50} = ^1/_{12,5}$ *сек*, т. е. увеличивается вдвое. По тем же причинам, что и при чересстрочном раз-

ложении, мерцание изображения (его крупных деталей) неощутимо.

Поясним, как получается выигрыш в полосе частот при точечном разложении. Представим себе произвольную кривую, отображающую изменение яркости вдоль какой-ни-

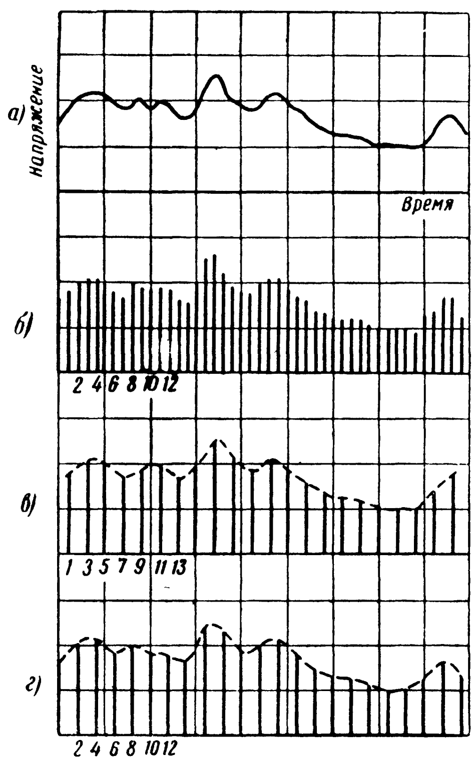


Рис. 44. Графики, поясняющие возможность сокращения полосы частот при чересточечном разложении.

будь строки передаваемого объекта (рис. 44,*а*). Изменение яркости объекта можно воспроизвести точечным (растровым) изменением яркости вдоль соответствующей строки изображения. Для этого можно подвести к управляющему электроду приемной трубки последовательность прямоугольных импульсов, величина которых равна мгновенному значению исходной кривой в момент начального положения импульса (рис. 44,*б*).

Вовсе не обязательно передавать прямоугольные импульсы от передатчика к приемнику; их можно формировать в приемнике особым генератором, а по каналу связи передавать только огибающую. Последняя, воздействуя на импульсы одинаковой величины, изменит величины импульсов (промодулирует импульсы по амплитуде).

Если длительность импульсов и промежутки между ними малы, то зритель с нормального расстояния рассматривания не увидит точечной структуры, и ощущаемое изменение яркости изображения будет соответствовать изменению яркости объекта.

При чересточечном разложении воспроизведение исходной кривой изменения яркости осуществляется за два цикла с помощью импульсов, повторяющихся с вдвое меньшей частотой. При первом движении пучка вдоль строки положение импульсов совпадает с положениями, которым на рис. 44,*б* присвоены нечетные (рис. 44,*в*), а при втором движении по этой же строке — четные номера (рис. 44,*г*). Импульсы второй последовательности заполняют промежутки между импульсами первой последовательности, и за счет зрительной памяти (и длительного послесвечения экрана) воспроизводится исходное распределение яркости, т. е. за счет зрительной памяти картина восстанавливается так, что будто бы происходит одновременное точечное воспроизведение с вдвое большей частотой точек.

Для того чтобы создать в приемнике импульсы, изображенные на рис. 44,*в* и *г*, помимо наличия местного генератора импульсов, нужно передать к приемнику огибающие этих импульсов. Последние формируются в передатчике с помощью специальных схем из исходного видеосигнала. Из графиков видно, что огибающие на рис. 44,*в* и *г* более плавные, каждая из них не воспроизводит мелких изменений, хотя в совокупности исходная кривая воссоздается. Сглаженность рассматриваемых кривых свидетельствует о том, что для их передачи нужен электрический канал с меньшей шириной полосы пропускания.

При цветной телевизионной передаче каждое из полей, изображенных на рис. 43, нужно передать в трех цветах, поэтому общее число полей полного цветного кадра равно двенадцати (см. рис. 45 на цветной вклейке). Время передачи каждого поля составляет $^1/_{150}$ *сек* и полный кадровый период равен $^{12}/_{150}={}^1/_{12,5}$ *сек*.

Помимо схем для создания точечного растра, передаю-

щая аппаратура в последовательной системе содержит более сложный, чем в черно-белом телевидении, синхрогенератор и ряд узлов для цветовой коррекции.

Диск с цветными фильтрами в приемнике должен вращаться с точно такой же скоростью, как и диск передающей камеры. Помимо этого, необходимо обеспечить синфазность их работы. Синхрогенератор, наряду с обычными синхронизирующими и гасящими импульсами, вырабатывает также фазирующие импульсы. Последние вводятся в сигнал во время действия кадрового гасящего импульса перед началом цветовых полей одного определенного цвета. Фазирующие импульсы управляют движением двигателей дисков с фильтрами как в приемнике, так и в камере.

В приемнике фазирующие импульсы отделяются от сигналов синхронизации и поступают в особую схему питания электродвигателя. Действие схемы сводится к тому, что если появление фазирующих импульсов не совпадает с моментом появления фильтра нужного цвета, двигатель тормозится до тех пор, пока не произойдет совпадение.

Цветная коррекция осуществляется в цветосмесителе, позволяющем раздельно регулировать сигналы разных цветов. Он состоит из трех усилителей с общим входом и выходом. На вход цветосмесителя подаются сигналы от камеры. Каждый из усилителей включается только на то время, пока происходит передача соответствующего цветового поля. Таким образом каждый из усилителей усиливает сигналы только одного цвета. Величины выходных сигналов могут раздельно регулироваться. Так осуществляется исправление цветовых характеристик отдельных узлов или создаются особые цветные художественные эффекты.

10. ОДНОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА С ПЕРЕДАЧЕЙ ЦВЕТОРАЗНОСТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Отличительной особенностью рассматриваемой системы является независимая передача яркостной информации изображения, т. е. сигналов, которые сами по себе создают на экранах приемников черно-белое изображение. Помимо яркостных сигналов, одновременно передаются особым образом сформированные цветовые сигналы, с помощью которых осуществляется окраска четкого черно-белого изображения.

В настоящее время эта система считается перспективной, в последние годы она введена в эксплуатацию в США. Опытное цветное телевизионное вещание в Москве также

использует рассматриваемую систему. На выходах передающей камеры имеются три сигнала U_R, U_G, U_B, полученные соответственно от «красной», «зеленой» и «синей» трубок. В приемнике после ряда преобразований для создания крупных деталей изображения получаются снова эти три сигнала. Последние, как обычно, управляют плотностями электронных пучков трехцветного приемного устройства.

Однако по каналу связи сигналы основных цветов в этой системе не передаются. Для удовлетворения требования совместимости, как уже было отмечено, один из передаваемых сигналов пропорционален яркостной составляющей светового объекта. Если этот сигнал подвести к управляющему электроду черно-белой трубки, то на экране мы получим изображение, правильно передающее ощущаемые яркости участков объекта — наиболее светлыми будут участки объекта желто-зеленых цветов, менее яркими — красноватых, самыми темными — синие, т. е. в соответствии со спектральной чувствительностью глаза. Если один этот яркостный сигнал подвести сразу ко всем трем управляющим электродам трехцветного приемного устройства, то зритель увидит черно-белое изображение, такое же, как на экране черно-белого приемника.

Создание яркостного сигнала диктуется не только требованием совместимости, но также и тем, что разрешающая способность глаза к черно-белым деталям значительно выше, чем к цветным. Поэтому спектр частот яркостного сигнала должен быть значительно шире, чем спектр сигналов, образующих окраску изображения. На экранах приемников при этом получается четкое черно-белое изображение, как бы раскрашенное более грубыми мазками (способ, повсеместно используемый в живописи и в полиграфии, соответствующий нашим естественным ощущениям при рассматривании природных объектов).

В рассматриваемой системе яркостный сигнал по своим электрическим характеристикам не отличается от сигналов действующей системы черно-белого телевидения — здесь принята та же частота разверток и общая полоса частот в канале передачи яркостного сигнала.

Колориметрические основания системы. С точки зрения возможности цветопередачи выбор одним из основных сигналов яркостного является вполне закономерным. Мы знаем, что цветность объекта можно характеризовать суммой белого и монохроматического излучений или суммой

белого и пурпурного оттенка. Цвет объекта можно характеризовать яркостью и двумя координатами любого цветового графика, например x и z, в системе XYZ. Если один из основных цветов — белый, то нужно передать еще два каких-нибудь цвета или д в е к о м б и н а ц и и из известных цветов и тогда, зная связь, существовавшую между ними при образовании комбинированных сигналов, можно будет снова выделить исходные сигналы путем обратного преобразования.

Поскольку от выхода передающих трубок до входа приемных трубок имеют дело не с цветами каких-нибудь излучений, а с электрическими величинами, все преобразования сигналов упрощаются и выполняются с помощью несложных электрических схем, производящих сложение, вычитание, уменьшение или увеличение «цветов».

Я р к о с т н ы й с и г н а л U_W образуется в результате суммирования (в простейшей потенциометрической схеме) мгновенных значений выходных напряжений передающих трубок:

$$U_W = \alpha U_R + \beta U_G + \gamma U_B.$$

Коэффициенты α, β и γ показывают долю соответствующих сигналов в смеси для получения на экране черно-белой трубки (или, что то же самое, при использовании сигнала U_W для одновременного управления тремя цветными трубками) правильной яркостной передачи цветов. Ясно, что если каждый из сигналов, соответствующих единичным цветам, равен 1 *в*, то для правильной яркостной передачи «синий» сигнал, подведенный к управляющему электроду черно-белой трубки или одновременно к трем управляющим электродам трехцветного устройства, должен быть уменьшен по сравнению с «зеленым» и даже «красным» сигналами смеси.

Количественные значения α, β и γ зависят от выбора основных цветов приемника, а также от колориметрических характеристик выбранного в качестве эталона белого цвета.

Передающая камера обычно конструируется так, что при передаче выбранного белого цвета три электрических сигнала на выходе камеры равны друг другу.

Для упрощения дальнейших рассуждений конкретизируем их цифрами, относящимися к внедряемому в Советском Союзе варианту системы, в ней в качестве эталона

белого используется так называемый источник B *, координаты которого в системе XYZ суть $x=0,35$ и $y=0,35$. Основные цвета приемника выбираются такими: красный—(R): $x_R=0,67$ и $y_R=0,33$; зеленый—(G): $x_G=0,21$ и $y_G=0,71$ и синий—(B): $x_B=0,14$, $y_B=0,08$.

Для образования из этих основных цветов смеси с цветностью источника C их нужно было бы сложить в следующем соотношении: 29% (R), 26% (G) и 45% (B). Для того, чтобы яркость составленной смеси не отличалась от субъективной яркости белого, яркости каждого из складываемых цветов, а значит и их количества, должны быть соответственно приведены к шкале субъективного восприятия, которое учитывается ординатами точек (R), (G) и (B) на графике системы XYZ, т. е. соответственно: y_R, y_G и y_B.

Поэтому, образуя яркостный сигнал в системе, характеризуемой вышеприведенными параметрами, суммирование должно производиться в отношении $0,29 \cdot 0,33 : 0,26 \cdot 0,71 : 0,45 \cdot 0,08 = 0,096 : 0,185 : 0,036$, что примерно равно относительному содержанию сигналов:

$$0,3:0,6:0,1, \text{ т. е. } \alpha=0,3, \ \beta=0,6 \text{ и } \gamma=0,1.$$

Для большей наглядности записей при рассмотрении колориметрических оснований системы будем обозначать напряжения U_R, U_G, U_B и U_W только соответствующими индексами R, G, B и W.

Итак, яркостный сигнал определяется как

$$W=0,3R+0,6G+0,1B.$$

Величины яркостных сигналов при передаче некоторых цветных полей иллюстрируются графиком на рис. 46,*д*.

Цветовые сигналы в одном из вариантов системы (принятой в настоящее время для цветного телевизионного вещания в Москве) формируются в виде разностей красный

---

* Белый цвет источника B несколько отличается от рассмотренного ранее равноинтенсивного цвета E ($x=0,33$; $y=0,33$). В американском варианте системы, в так называемой системе NTSC, используется белый цвет источника C ($x=0,31$; $y=0,31$).

Приводимые дальше цифры являются округленными, поясняющими смысл преобразований. Более подробные сведения о параметрах внедряемой в опытное вещание в Москве системы цветного телевидения приведены в приложении (в конце книги)

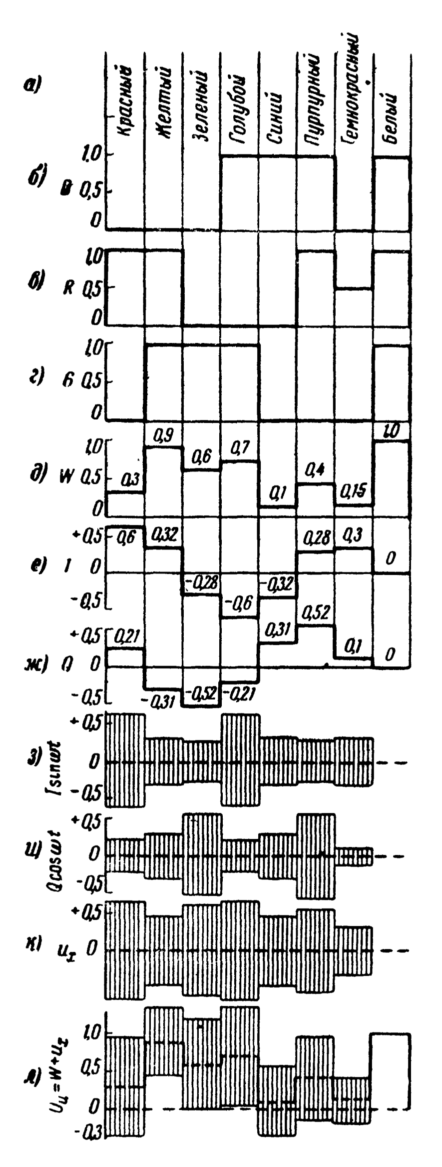


Рис. 46. Формы сигналов при передаче нескольких характерных цветов в системе с цветоразностными составляющими.

минус белый ($R-W$) и синий минус белый ($B-W$). Эта цветоразностная система образуется, следовательно, группой из трех сигналов: W, $R-W$ и $B-W$. Напомним, что яркостный (или черно-белый) сигнал W образован для возможности приема телевидения цветной системы на обычные черно-белые телевизоры.

Достоинства цветоразностной системы заключаются в следующем. Как показывает практика, в цветных изображениях большую долю занимают места неокрашенные или слабо окрашенные (т. е. участки с весьма слабой насыщенностью). Если бы вместо сигналов цветоразностной системы передавались, например, сигналы W, R и B, то на белых участках изображения существовали бы все эти три сигнала, так как в белом существуют сигналы R и B. Белый сигнал согласно формуле $W=0{,}3R+0{,}6G+0{,}1B$ образуется при равенстве $R=G=B$ (например, $R=$ $=G=B=1$ световому ватту), т. е. на белом яркостный сигнал $W=R=G=B$. Это значит, что цветоразностные сигналы $R-W$ и $B-W$ на белом равны нулю. Таким образом,

при передаче черно-белых мест изображения в цветоразностной системе сигналы цветности исчезают (в слабо насыщенных местах эти сигналы будут относительно малы). Это обстоятельство оказывается весьма выгодным, так как сигналы цветности, создающие заметные помехи на экранах черно-белых телевизоров, оказываются во многих существенных местах передаваемых изображений отсутствующими.

Цветовые сигналы выбраны так, что они не влияют на яркость, а лишь определяют цветность изображений. Можно изобразить положения фиктивных основных цветов[1] $(R-W)$ и $(B-W)$ на цветовом графике системы XYZ. Поскольку эти цвета обладают нулевой яркостной составляю-

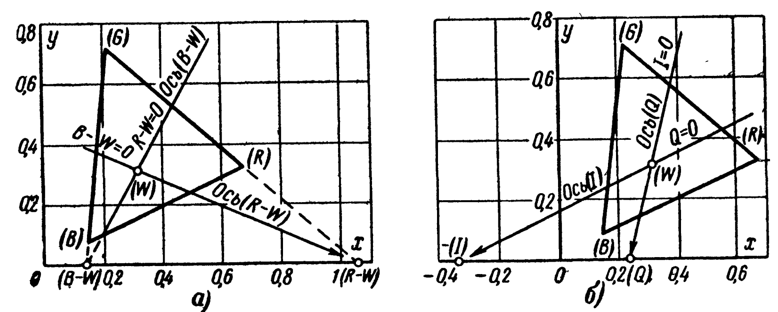


Рис. 47. Положения фиктивных основных цветов в системе с цветоразностными составляющими.

щей (что, конечно, не имеет физического смысла, ибо цвет немыслим без яркости), то они аналогично безъяркостным основным цветам X и Z в плоскости цветового графика должны лежать на горизонтальной оси $(y=0)$.

Далее характерной особенностью основного цвета $(R-W)$, при образовании его как смеси основных цветов (R), (G), (B), является отсутствие синего цвета. Значит точка, соответствующая цвету $(R-W)$, находится на пересечении прямой, проходящей через (G) и (R), с осью

[1] В дальнейшем при изложении колориметрических оснований системы будем обозначать напряжения, соответствующие основным цветам, буквами в круглых скобках. Например, (R) — напряжение, соответствующее передаче основного красного цвета; при этом два других напряжения G и B равны нулю. Ясно, что практически в системе не может быть напряжений $(R-W)$ или $(B-W)$ и они лишь выражают положение точек, соответствующих основным цветам на графиках. $R-W$ — количество (модуль) «цвета» $(R-W)$; $B-W$ — модуль «цвета» $(B-W)$.

абсцисс. Цвет $(B-W)$ расположен на пересечении прямой, проходящей через G и B, с осью абсцисс (рис. 47,*а*).

Таким образом, в канале электрической связи созданы три новых основных цвета: (W), $(R-W)$ и $(B-W)$, из которых два последних являются нереальными. К этим цветам применимы колориметрические принципы смешения. Так, в результате суммирования мгновенных значений напряжений W и $R-W$ получаются сигналы, соответствующие цветностям, расположенным на прямой, проходящей через (W) и $(R-W)$ [положение белого (W) совпадает с белым цветом выбранного источника]. Смешение сигналов W и $B-W$ соответствует получению цветностей, расположенных на прямой, проходящей через (W) и $(B-W)$ Равенство нулю сигналов $R-W$ и $B-W$ приводит нас в точку (W), т. е. свидетельствует о передаче белого цвета с яркостью, определяемой величиной напряжения W.

Поскольку новые основные цвета, кроме (W), являются нереальными, ибо они образованы смешением не только положительных, но и отрицательных количеств R, G, B, а именно:

$$R-W=0{,}7R-0{,}6G-0{,}1B;$$

$$B-W=0{,}3R-0{,}6G+0{,}9B,$$

то реальные цвета, получаемые от смешения этих новых основных, по-прежнему расположены внутри треугольника $(R)(G)(B)$. Напряжения, соответствующие модулям цвета $R-W$ и $B-W$, могут в действительности принимать лишь такие положительные и отрицательные значения, при которых результаты смешения расположены, во всяком случае, в зоне, ограниченной линией спектральных цветов.

Переход к новым основным цветам позволяет построить цветовой график в прямоугольной системе координат, начало которой совпадает с точкой (W), по гризонтальной оси откладываются количества цвета $(B-W)$, а по вертикальной оси — количества цвета $(R-W)$ * (рис. 48).

* Линия спектральных цветов на этом графике не показана Ориентировка в цветовом тоне и насыщенности возможна, ибо показано положение основных цветов (R), (G) и (B).

График построен в плоскости единичной яркости $(Y=1)$, т. е в плоскости, параллельной XOZ, расположенной на уровне $Y=1$ системы XYZ. Поэтому по осям откладываются относительные количества цветов $\frac{R-W}{W}$ и $\frac{B-W}{W}$, т. е. приведенные к единичной яркости (переход, аналогичный замене модулей трехцветными коэффициентами).

Для уяснения в дальнейшем способа передачи цветовых сигналов по каналу связи нужно отметить, что цветность любой реальной смеси (цветовой тон и насыщенность) можно определить, как геометрическую сумму соответствующих количеств $R—W$ и $B—W$. Рассмотрим это положение на ряде примеров.

Положим, что передается поле красного цвета, совпадающего с (R), дающее выходной сигнал $R=1$. В этом

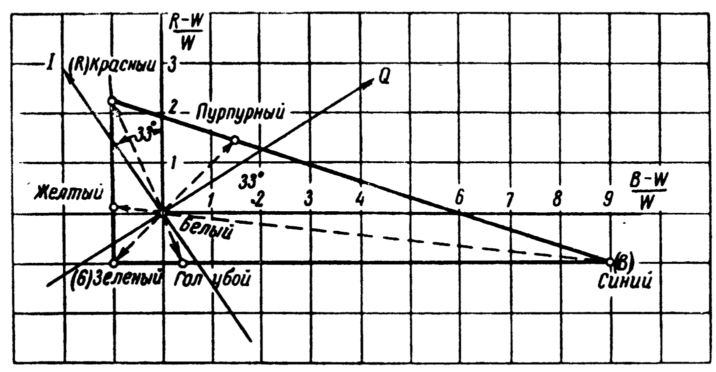


Рис. 48. Треугольник RGB в системе координат W, $\frac{R-W}{W}$ и $\frac{B-W}{W}$

случае $G=0$ и $B=0$. Определяя яркостный сигнал по соответствующей формуле, получим: $W=0{,}3$ и цветовые сигналы, подсчитанные по вышеприведенным формулам, равны: $R—W=0{,}7$ и $B—W=—0{,}3$. Тогда координаты красного цвета на графике будут:

$$\frac{R-W}{W}=2{,}3 \text{ и } \frac{B-W}{W}=-1.$$

Для построения точки (R) нужно на графике по горизонтальной оси отложить величину —1 (знак минус указывает, что отсчет ведется влево от вертикальной оси), а по вертикальной оси — величину 2,3; затем восстановить в этих точках перпендикуляры к осям. Пересечение последних определит положение точки (R). Если провести между началом координат и точкой (R) прямую, то она, в сущности, явится результирующим вектором, полученным от геометрического сложения векторов соответствующих длин, направленных по координатным осям.

Положение результирующего вектора, т. е. угол между одной из осей и вектором, определяет **цветовой тон**, а относительная **длина вектора** — **насыщенность цвета**.

Таким же образом любая другая цветность может быть представлена в виде геометрической суммы двух взаимно перпендикулярных векторов, длины которых соответствуют количествам $R—W$ и $B—W$. Так, при передаче синего цвета имеем: $R=0$; $G=0$; $B=1$; $W=0{,}1$, т. е. $\frac{R-W}{W}=-1$ и $\frac{B-W}{W}=9$.

При передаче желтого цвета, аналогичного смеси равноинтенсивных зеленого и красного, имеем; $R=1$; $G=1$; $B=0$; $W=0{,}9$; $\frac{R-W}{W}=0{,}11$; $\frac{B-W}{W}=-1$ и т. п.

Направления векторов для нескольких цветов показаны на рис. 48.

Выясним, как происходит образование цветного изображения в данной системе, предполагая, что по трем линиям связи передаются к приемнику сигналы W, $R—W$ и $B—W$.

Мы уже говорили, что в связи с меньшей разрешающей способностью глаза к цветным деталям частотные спектры цветовых сигналов могут быть более узкими, чем спектр яркостного сигнала. Сигналы R, G и B на выходах передающих трубок не ограничены в ширине спектров; последние соответствуют максимальной четкости, осуществимой в системе, например, при 600 строках разложения, спектры этих сигналов простираются каждый до 6 *Мгц*. Поэтому сигнал W, образующийся в результате суммирования R, G и B, создает на экране четкое черно-белое изображение.

Сигналы R, B и W используются также для формирования цветоразностных сигналов. Однако перед тем как подать эти сигналы в формирующие схемы, их частотные спектры ограничиваются с помощью электрических фильтров, пропускающих только низкочастотные составляющие этих сигналов (рис. 49). Поэтому частотные спектры цветовых сигналов ограничены и практически простираются примерно до 20% от высшей частоты яркостного сигнала. Цветовые сигналы сглажены, они не воспроизводят быстрых изменений, а значит, и мелких цветных деталей изображения.

Выделенные в **приемнике** цветоразностные сигналы используются в схеме формирования третьего цветоразно-

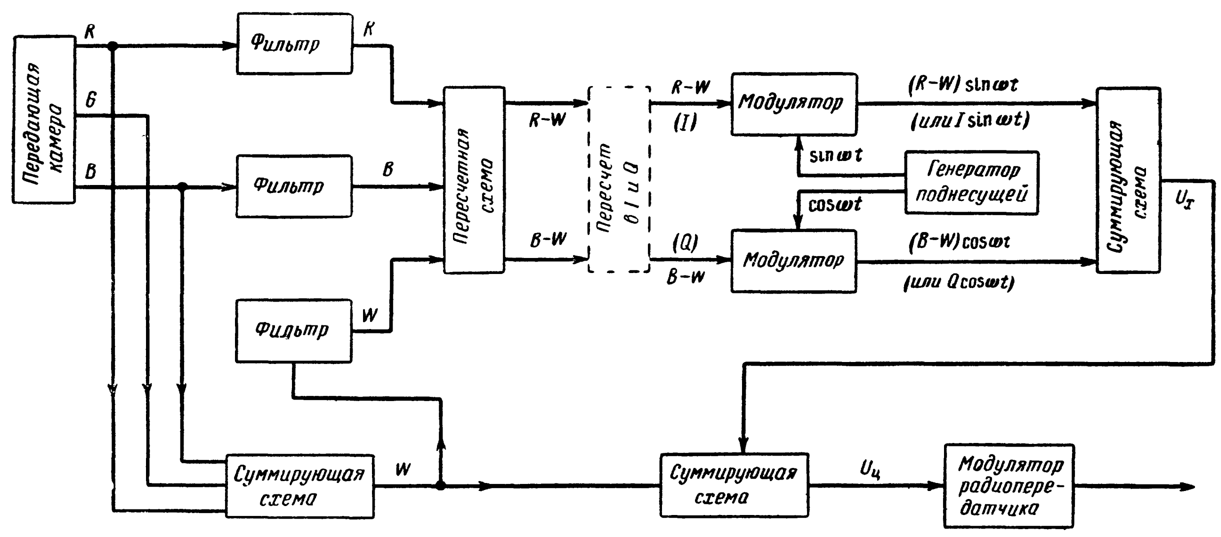


Рис. 49. Блок-схема передатчика системы с цветоразностными составляющими.

стного сигнала: зеленый минус белый и параллельно поступают в схему сложения (усилитель-смеситель) с яркостным сигналом (рис. 50).

Имея в виду равенство

$$G - W = -0{,}51\,(R - W) - 0{,}16\,(B - W),$$

в справедливости которого можно убедиться, если произвести преобразования правой части и сравнить результат с очевидным равенством $G - W = -0{,}3R + 0{,}4G - 0{,}1B$, нетрудно составить схему, формирующую третий разностный сигнал. Для этого нужно сложить 51% первого из цветоразностных сигналов с 16% второго, причем оба сигнала складываются в обратной полярности.

Каждый из трех узкополосных разностных сигналов складывается с широкополосным яркостным сигналом, и результирующие сигналы непосредственно подводятся к соответствующим управляющим электродам трехрастровой приемной трубки.

Сложение узкополосного сигнала $R - W$ с сигналом W дает низкочастотные составляющие R, ибо $R - W + W = R$, высокочастотные составляющие W, так как высокочастотные составляющие $R - W$ равны нулю. Аналогично на выходе второго суммирующего устройства получаются низкочастотные составляющие зеленого цвета G и высокочастотная часть яркостного сигнала. Третье суммирующее устройство дает соответственно B и также W.

Таким образом, крупные детали изображения воспроизводятся в цветах, тогда как мелкая структура, в результате одновременного воздействия на все три пушки высокочастотных ссоставляющих сигнала W, воспроизводится бесцветной.

В американском варианте системы цветоразностные сигналы заменены сигналами, оси которых в плоскости постоянной яркости повернуты относительно осей $R - W$ и $B - W$ на 33° (рис. 48). Причины замены сигналов мы рассмотрим ниже. Новые сигналы, обозначаемые I и Q, образуются в результате смешения цветоразностных сигналов в количествах, определяемых нижеследующими равенствами:

$$I = 0{,}74\,(R - W) - 0{,}27\,(B - W);$$
$$Q = 0{,}48\,(R - W) + 0{,}4\,(B - W).$$

Таким образом, формирование сигналов I и Q в передатчике не представляет трудностей и осуществляется ана-

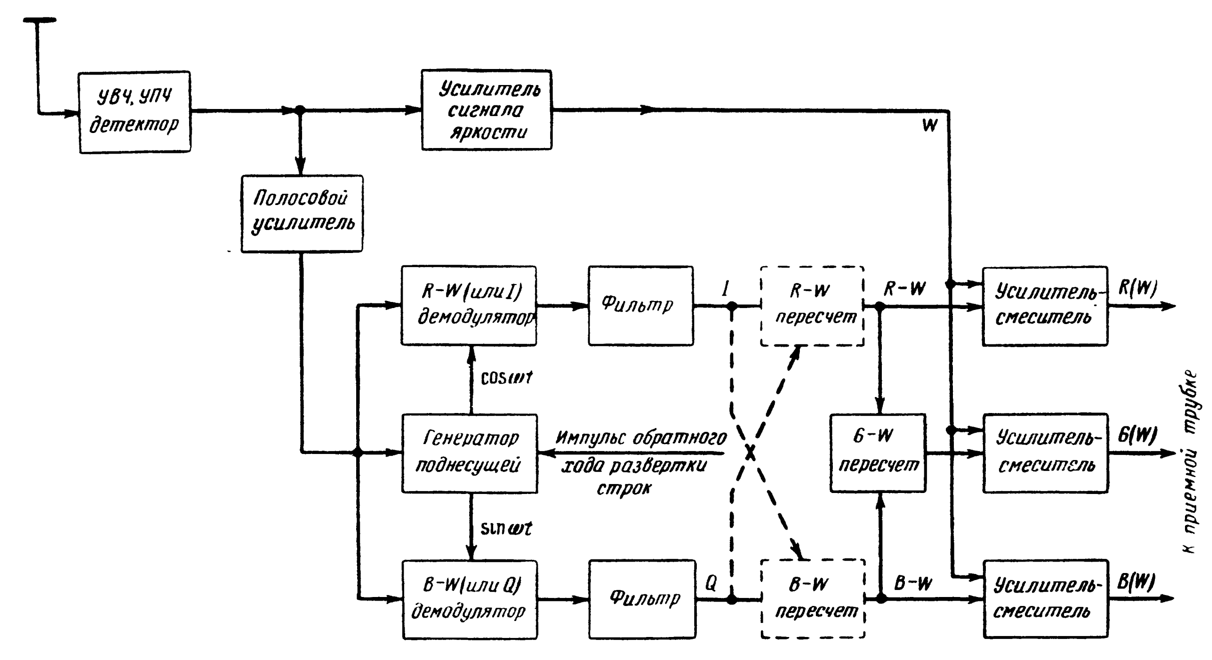


Рис. 50. Блок-схема приемника системы с цветоразностными составляющими.

логичными схемами. На графиках *е* и *ж* рис. 46 отмечены значения сигналов I и Q при передаче простейших цветных полей.

В приемнике после выделения сигналов I и Q для образования цветоразностных сигналов (или непосредственно R, G и B) применяют простые пересчетные потенциометрические схемы (называемые матричными), построенные в соответствии с равенствами:

$$R - W = 0{,}96I + 0{,}62Q;$$
$$B - W = -1{,}1I + 1{,}7Q;$$
$$G - W = -0{,}28I - 0{,}64Q.$$

Идея работы матричных схем поясняется рис. 51. На входы этих схем подаются от соответствующих усилителей сигналы I и Q в необходимой полярности. Если

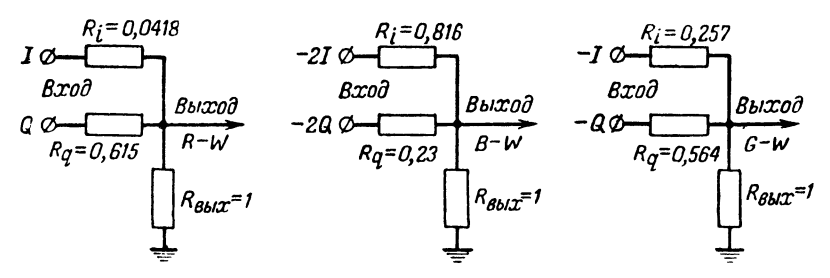


Рис. 51. Принцип действия матричных схем.

внутреннее сопротивление усилителей I и Q достаточно малое, то потенциометрические делители $R_{\text{вых}}(R_{\text{вых}} + R_i)$ и $R_{\text{вых}}(R_{\text{вых}} + R_q)$ действуют независимо.

Например, в первой схеме от сигнала I, поданного на вход, на выходе останется часть

$$I_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_i} I = \frac{1}{1 + 0{,}0418} I = 0{,}96I,$$

а от сигнала Q

$$Q_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}} + R_q} Q = \frac{1}{1 + 0{,}615} Q = 0{,}62Q,$$

что и требуется согласно вышеприведенному выражению.

Образование сигналов, управляющих цветной трубкой, следует далее уже рассмотренной схеме.

Цветовые сигналы I и Q не влияют на яркость изображения; основные цвета (I) и (Q) расположены также в безъяркостной плоскости XOZ системы XYZ (рис. 47,*б*). Ось сигналов Q проведена в направлении, соединяющем пурпурно-синеватую область цветового графика с зеленовато-желтой, а ось сигналов I проведена в направлении, соединяющем сине-голубую область с оранжевой.

В соответствии с данными о цветоразличении мелких деталей частотный спектр сигнала I простирается до 25—30% от высшей частоты сигнала W (рис. 52,*б*), а частотный спектр сигнала Q — лишь до частоты, составляющей 12—15% от высшей частоты сигнала W (рис. 52,*в*). При этом самые крупные детали изображения с размерами, не меньшими 6—7 черно-белых (наименьших) элементов, окрашиваются во все возможные от смешения R, G и B цвета; более мелкие детали с размерами, не меньшими 3—4 черно-белых элементов, окрашены в цвета, являющиеся результатом смешения сине-голубого и оранжевого, и, наконец, мельчайшие детали воспроизводятся бесцветными.

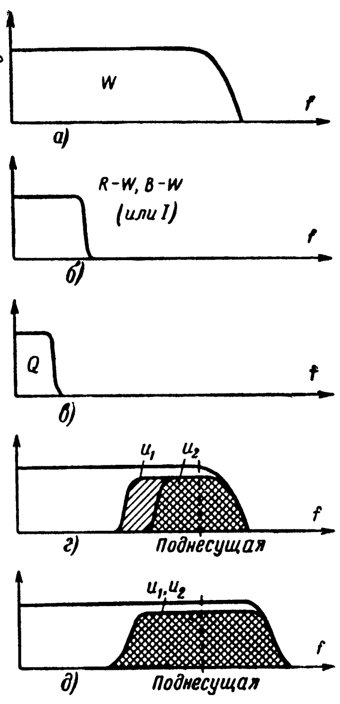


Рис. 52. Частотные спектры сигналов в системе с цветоразностными составляющими.

Передача сигналов по каналу связи. Итак, в телевизионном цветном передатчике рассматриваемой системы сформированы три сигнала: W, $R—W$ и $B—W$ (или W, I и Q) с частотными спектрами, иллюстрируемыми рис. 52,*б* и *в*. Эти сигналы надлежит передать к приемнику.

Принципиально простейшим способом передачи явилось бы создание и излучение трех модулированных высокочастотных колебаний, их прием тремя приемниками и детек-

гирование исходных сигналов. Однако этот способ не является наилучшим, так как усложняется состав аппаратуры и используется более широкая полоса частот, чем полоса, отведенная для черно-белого телевидения. Последний фактор также важен, ибо в частотном диапазоне, отведенном для телевизионного вещания, наблюдается «теснота», и расширение полосы частот одного канала может осуществляться лишь за счет сокращения числа каналов. Создатели системы пошли по пути уплотнения частотного спектра, хотя при этом возникают специфические искажения и приемное устройство несколько усложняется.

Поэтому вопрос о способе передачи сигналов все еще остается открытым и ждет более рационального, чем существующие, решения. Рассмотрим разработанные методы уплотнения частотного спектра, представляющие принципиальный интерес.

Прежде всего оба цветоразностных сигнала (или I и Q) можно передать с помощью одного вспомогательного несущего колебания, частота которого выбирается несколько ниже граничной частоты яркостного сигнала, т. е. находится в пределах спектра черно-белого телевидения. Это колебание будем в дальнейшем именовать «поднесущей».

Поднесущая создается на передающем конце тракта особым генератором, имеющем два выхода, на одном из которых снимается напряжение, сдвинутое по фазе относительно другого на 90°, т. е. генератор создает синусоидальное и косинусоидальное колебания одной частоты. Сигнал $R—W$ (или I) модулирует синусоидальное колебание, а сигнал $B—W$ (или Q) — косинусоидальное. В результате получаем два колебания — u_1 и u_2:

$$u_1 = (R - W)\sin \omega t, \text{ или } u_1 = I \sin \omega t;$$

$$u_2 = (B - W)\cos \omega t, \text{ или } u_2 = Q \cos \omega t,$$

где $\frac{\omega}{2\pi} = f_n$ — частота поднесущей.

Затем эти колебания складываются в простейшей суммирующей схеме. Результирующее колебание u_x можно определить аналитически, проделав тригонометрические преобразования,

$$u_x = u_1 + u_2 = \sqrt{(R - W)^2 + (B - W)^2}\sin(\omega t + \varphi)$$

или

$$u_x = \sqrt{I^2 + Q^2}\sin(\omega t + \varphi)$$

где $\operatorname{tg}\varphi = \frac{B - W}{R - W}$, или $\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{I}$.

Последнее выражение показывает, что результирующее колебание промодулировано по амплитуде и по фазе. Глубина модуляции зависит от величин сигналов $R—W$ и $B—W$ (или I и Q); амплитуда результирующего колебания — геометрическая сумма сигналов $R—W$ и $B—W$ (или I и Q), а фазовый сдвиг относительно некоторого начального положения определяется отношением сигналов.

Поскольку результирующее (так называемое квадратурно-модулированное) колебание u_x является суммой синусоидального и косинусоидального колебаний, имеется принципиальная возможность после передачи этого колебания к приемнику выделить вновь раздельно сигналы, пропорциональные амплитудам суммируемых колебаний

Действительно, мгновенное значение суммарного колебания u_x через каждые четверть периода попеременно в точности равно амплитудным значениям либо u_1, либо только u_2.

Поскольку

$$u_x = (R - W)\sin\omega t + (B - W)\cos\omega t,$$

то при $\omega t = 0,\ \pi,\ 2\pi \ldots\ u_x = \pm(B - W)$, т. е, в эти моменты времени u_x не зависит от u_1, а при

$$\omega t = \frac{\pi}{2},\ \frac{3}{2}\pi,\ \frac{5}{2}\pi \ldots\ u_x = \pm(R - W),$$

т. е. в эти моменты времени u_x не зависит от u_2.

Можно представить себе схему с применением вспомогательного импульсного генератора, с помощью которой выделяются исходные сигналы цветности. Однако демодулятор может быть сконструирован и без импульсов с помощью вспомогательного генератора непрерывного колебания с частотой поднесущей. Принцип действия такого демодулятора описывается ниже.

Можно провести аналогию между результирующим колебанием и результирующим цветом, получаемым от смешения цветов $R—W$ и $B—W$ (или I и Q). Действительно, имея в виду рассуждения и построения, которые мы приво-

дили при определении результирующих векторов цвета, складывая $R-W$ и $B-W$ и представляя высокочастотное колебание в виде вращающегося с частотой ω вектора, длина которого пропорциональна амплитуде, а начальное положение относительно некоторой фиксированной оси — фаза, можно заметить, что амплитуда результирующего колебания определяет насыщенность передаваемого цвета, а фазовый сдвиг — цветовой тон. На графике рис. 46,*з*, *и*, *к* изображены высокочастотные колебания u_1, u_2 и результирующее колебание u_r для нескольких простейших цветов при передаче с помощью сигналов I и Q. Аналогично можно было бы построить графики с использованием цветоразностных сигналов.

Таким образом, в результате описанного процесса число сигналов, подлежащих передаче к приемнику, уменьшилось до двух: яркостного видеосигнала W и колебания с частотой поднесущей, амплитуда и фаза которого отображают цветность передаваемого изображения.

Оба эти колебания можно было бы передать независимо с помощью двух радиопередатчиков и в приемнике вновь выделить исходные сигналы W и u_r, а затем — W, $R-W$ и $B-W$. Однако пошли по пути дальнейшего уплотнения частотного спектра: сигналы цветоности u_x передается в н у т р и п о л о с ы ч а с т о т яркостного сигнала W. На передающем конце производится сложение сигналов, так что получается только один результирующий сигнал передаваемого цветного изображения:

$$U_ц = W + u_x.$$

Далее этот сигнал модулирует одну несущую в диапазоне УКВ, излучается и после соответствующих преобразований в приемнике вновь выделяют сигнал $U_ц$.

У читателя возникает естественный вопрос: каким образом из сигнала $U_ц$ вновь выделить исходные сигналы W, $R-W$ и $B-W$ и не является ли суммирование необратимым процессом, тем более, что частотные спектры сигналов W и u_x совпадают (рис. 52)?

Анализ частотного спектра телевизионных сигналов показывает, что так как развертка является периодическим процессом, сигнал можно представить в виде суммы большого числа гармоник, частоты которых к р а т н ы частотам развертки (рис. 53). Спектр телевизионного сигнала не сплошной, а дискретный, состоящий из гармоник, ча-

стоты которых кратны частоте горизонтальной развертки $f_г$, а амплитуды убывают по мере увеличения частоты, и гармоник, частоты которых отстоят от центральной $nf_г$ (где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$) и друг от друга на частотные интервалы, равные частоте вертикальной развертки $f_к$. Амплитуды этих гармоник убывают по мере удаления частот от $nf_г$.

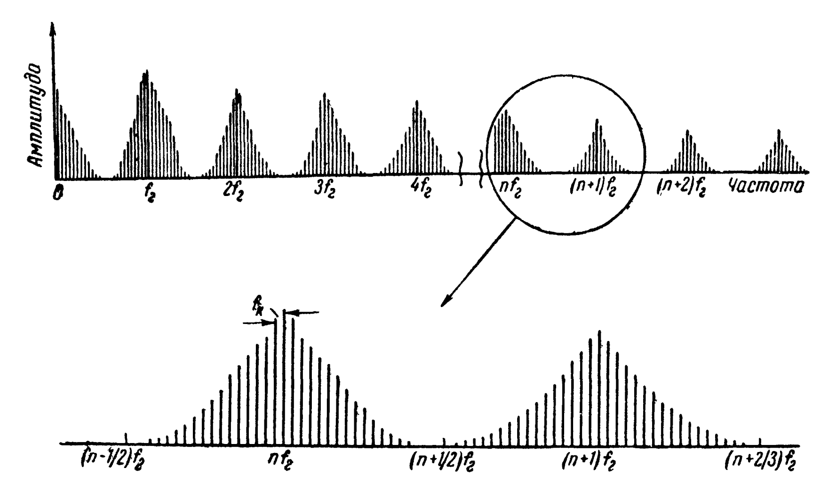


Рис. 53. Частотный спектр телевизионных сигналов.

Поскольку промежуток между частотами двух соседних гармоник $nf_г - (n-1) f_г = f_г$ велик по сравнению с частотой вертикального разложения, к середине этого промежутка амплитуды боковых гармоник успевают значительно уменьшиться и практически середина каждого большого частотного промежутка оказывается незаполненной. Эти пустые зоны используются для передачи сигнала цветности u_x.

Частота поднесущей выбирается равной нечетному числу половины строчной частоты: $\frac{(2n-1)}{2} f_г$. Тогда после суммирования сигналов W и u_x их частотные спектры будут взаимно перемежаться. Поднесущая и гармоники сигнала u_x попадут в пустые промежутки спектра сигнала W и наоборот (рис. 54). Нужно иметь в виду, что структура спектра сигнала u_x аналогична структуре спектра видеосигнала W, за тем исключением, что спектр видеосигнала простирается

от нулевой частоты, а дискретный спектр сигнала u_x группируется вокруг частоты поднесущей.

Если бы удалось построить электрический фильтр, который «процеживал» бы спектр результирующего сигнала, то можно было бы непосредственно выделить W и u_x. Однако распространенные электрические фильтры способны выделять лишь сплошные частотные области. Но разделения сигналов и не требуется, ибо сигнал $U_ц$, подведенный к управляющим электродам трехрастровой трубки или к черно-белой трубке, создаст изображение, субъективно

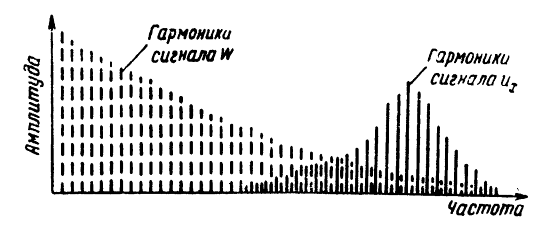


Рис. 54. Гармоники сигнала u_x попадают после суммирования в „пустые" зоны спектра сигнала W.

сходное с изображением, получаемым при использовании только сигнала W.

Причина отмеченного явления заключается в следующем. Если частота некоторого колебания равна нечетному числу половин строчной частоты, то период этого колебания, выраженный в единицах длины строки, меньше длины строки в целое с половиной число раз, т. е вдоль строки укладывается нечетное число полупериодов этого колебания (рис. 55).

При чересстрочной развертке число строк разложения, как известно, выбирается нечетным. Это означает, что от момента окончания развертки данной строки до момента начала следующей развертки этой же строки пройдет четное число строчных интервалов. А потому некоторый периодический сигнал, управляющий яркостью, будет в начале следующей развертки данной строки в том же фазовом положении, в каком он был при окончании предыдущей развертки этой строки. Если частота сигнала равна $\frac{(2n-1)}{2} f_г$, то распределение яркости, создаваемое этим сигналом при данной развертке, будет в противофазе с рас-

пределением яркостей при предыдущей (и последующей) развертке, как это показано на рис. 55.

Глаз наблюдателя будет усреднять (во времени) эти противофазные изменения яркости и они почти не исказят основное изображение, тем более, что размеры элементов мерцающей яркостной структуры сравнимы с размерами предельно малого элемента изображения, ибо частота поднесущей достаточно велика.

В приемном устройстве выделенный после детектирования сигнал $U_ц$ используется как сигнал W (рис. 50)

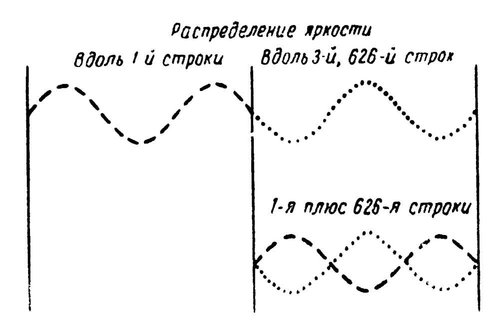


Рис. 55. Вдоль одной строки укладывается нечетное число полупериодов колебания с частотой, кратной нечетному числу половин строчной частоты.

Параллельно этот сигнал подводится к полосовому фильтру, пропускающему только тот частотный диапазон, в котором содержатся составляющие сигнала u_x.

Выделенный таким образом сигнал u_x содержит высокочастотные составляющие сигнала W. Амплитуды этих мешающих гармоник малы по сравнению с гармониками сигнала u_x и убывают по мере приближения частот к граничной.

Сигнал u_x подводится к схемам синхронных детекторов (точнее преобразователей частоты), в которых происходит выделение сигналов I и Q (или непосредственно сигналов $R—W$ и $B—W$). К детектору, помимо сигнала u_x, подводится колебание с частотой поднесущей ω, создаваемое местным генератором, к детектору сигнала I (или $R—W$) — косинусоидальное, а к детектору сигнала Q (или $B—W$) — синусоидальное. При синхронном детектировании сигнала u_x несколько ослабляются мешаю-

щие высокочастотные составляющие сигнала W, так как амплитуды мешающих гармоник, расположенных на оси частот симметрично относительно частоты поднесущей, не равны друг другу, а амплитуды симметричных гармоник сигнала u_x в некотором частотном интервале равны друг другу. Если передаются цветоразностные сигналы, то на выходах демодуляторов получаются непосредственно сигналы $R—W$ и $B—W$; схемы пересчета отсутствуют.

Частота вспомогательного генератора приемника должна быть в точности равной частоте поднесущей, кроме того, фаза колебания должна быть согласована с нулевой фазой принимаемого сигнала u_x, ибо фазовые различия непосредственно преобразуются в изменения цветовых

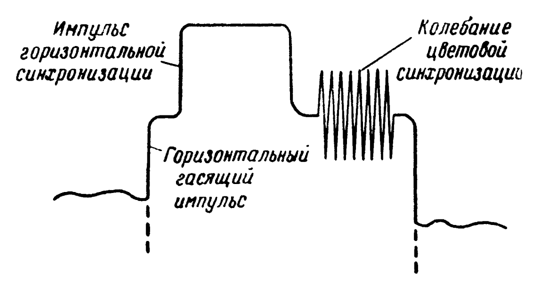


Рис. 56. Форма сигнала синхронизации в системе с цветоразностными составляющими.

сигналов, т. е. приводят к искажениям. Поэтому местный генератор **принудительно управляется** приходящими сигналами во время интервала строчного обратного хода. После создания импульса строчной синхронизации синхрогенератор передатчика подает несколько калиброванных по фазе циклов поднесущей (рис. 56).

Рассмотрим теперь причины, по которым в американском варианте системы перешли от цветоразностных сигналов $R—W$ и $B—W$ к сигналам I и Q.

Одним из радикальных способов уменьшения видимости мелкоструктурной сетки на изображении, обязанной наличию цветовой поднесущей, является увеличение частоты последней. При этом размеры отдельных элементов сетки становятся все меньшими, и если частота поднесущей выбрана вблизи верхней граничной частоты спектра видеочастот, то размеры элемента сетки становятся соизмеримыми с размерами наименьшей яркостной детали, воспроизводимой данной системой.

Увеличение частоты цветовой поднесущей связано с ограничением верхней половины спектра модуляционных частот: верхние боковые модуляционные частоты либо полностью, либо в некотором диапазоне подавляются, происходит переход к передаче с ассиметричными боковыми модуляционными полосами.

При том способе модуляции, который принят в рассматриваемой системе (при так называемой двухфазной или квадратурной модуляции), подавление одной из боковых модуляционных полос в спектрах обоих промодулированных сигналов (до сложения) приводит при детектировании результирующего колебания к появлению перекрестных (комбинационных) гармонических составляющих, частоты которых частично совпадают с частотами полезных низкочастотных сигналов.

Перекрестные искажения могут быть уменьшены, если один из складываемых сигналов содержит обе половины модуляционного спектра; например, если u_2 содержит обе половины модуляционного спектра, а модуляционный спектр второго сигнала u_1 подавлен лишь частично (рис. 52,*г*). Так, если выбрать частоту цветной поднесущей на 0,5 *Мгц* ниже верхней граничной частоты видеосигнала, то один из сигналов u_2 может содержать симметричный спектр боковых частот, простирающийся на 0,5 *Мгц* выше и ниже поднесущей, а спектр второго сигнала может простираться выше поднесущей на 0,5 *Мгц*, а ниже ее — значительно больше, например на 2 *Мгц*. При этом после детектирования частоты комбинационных гармоник в канале сигнала u_2 будут иметь значения от 0,5 до 2 *Мгц* и могут быть без ущерба для качества подавлены с помощью фильтра.

При выборе цветоразностных сигналов *R*—*W* и *B*—*W* не предполагается, однако, что они будут передаваться с различными по ширине спектрами и что, следовательно, четкости цветных деталей, соответствующих этим сигналам, будут различными. Поэтому, используя данные о восприятии мелких цветных деталей, были выбраны новые сигналы *I* и *Q*, оси которых повернуты относительно осей сигналов *R*—*W* и *B*—*W* на 33°, причем ось сигналов *Q* проходит через синевато-пурпурную и желтовато-зеленую области графика и потому, как уже указывалось, средние и мелкие по величине детали изображения, соответствующие частотам выше 0,5 *Мгц*, воспроизводятся без ущерба для качества без этих цветов.

В связи с тем, что абсолютная ширина спектра видеосигналов, предусмотренная советским телевизионным стандартом, на 2 *Мгц* больше, чем в США, при обсуждении вопроса о целесообразности внедрения рассматриваемой системы в Советском Союзе, практически проводится сравнение обоих методов передачи сигналов. По-видимому, с точки зрения качества воспроизведения цветного и черно-белого изображений, а также ввиду некоторого упрощения схем приемников будет отдано предпочтение цветоразностным сигналам $R - W$ и $B - W$ с симметричной передачей модуляционных спектров обоих цветоразностных сигналов (рис. 52,*д*) на поднесущей с частотой 4,43 *Мгц*. Частота поднесущей в американской системе NTSC равна 3,58 *Мгц*.

Особенности приемников. Остановимся более детально на специфических особенностях приемников рассматриваемой системы цветного телевидения.

Мы отмечали, что приемное устройство до детектора включительно не отличается от соответствующих узлов черно-белого приемника. Однако это верно лишь с принципиальной точки зрения. К цепям прохождения сигналов изображения в цветном приемнике рассматриваемой системы предъявляются более жесткие требования в отношении допустимости отклонения параметров от номинальных значений.

Действительно, в черно-белых приемниках форма кривой избирательности, особенно в области частот, дальше отстоящих от несущей, может меняться в значительных пределах. Например, в большинстве приемников, начиная с 3—3,5 *Мгц*, начинается плавное уменьшение коэффициента усиления, что приводит лишь к некоторому изменению контраста мелких деталей (уменьшение четкости в горизонтальном направлении).

В приемниках цветного телевидения завал частотной характеристики в области высоких телевизионных частот приведет к относительному ослаблению сигналов цветности. Это вызовет неприятные цветовые искажения изображения. Поэтому важным требованием является равномерность частотной характеристики усилителя промежуточной частоты в полосе пропускания.

Выполнение указанного требования приводит к тому, что величина усиления на каждый каскад усилителя промежуточной частоты оказывается меньшей, чем в соответствующем черно-белом приемнике, и поэтому усилитель

промежуточной частоты цветного приемника должен содержать на 1—2 каскада больше.

Далее, поскольку в диапазоне, близко примыкающем к несущей звука, расположена цветовая поднесущая, между ними при детектировании возникают взаимные искажения с появлением интенсивного колебания с разностной частотой. Поскольку частота разностного колебания не очень велика (порядка 2 *Мгц*), вызываемая этим колебанием на экране сетка с достаточно крупной структурой будет хорошо заметна.

Поэтому в канале до детектора должно быть предусмотрено более значительное подавление несущей звука, чем в черно-белых приемниках.

Выполнение двух указанных требований в свою очередь приводит к необходимости повышения стабильности частоты колебаний гетеродина.

К видеоусилителям цветного приемника предъявляются особо жесткие требования линейности амплитудной характеристики, так как нелинейные искажения приводят к неправильной цветопередаче.

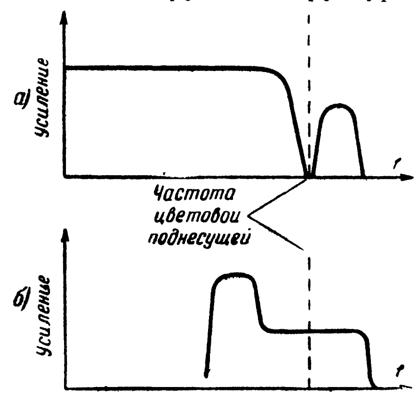


Рис. 57. Частотные характеристики
а — видеоусилителя сигнала $U_ц$; *б* — полосового фильтра для выделения сигнала u_x.

В некоторых случаях в схему усилителя яркостного сигнала вводится режекторный фильтр, настроенный на частоту цветовой поднесущей (рис. 57,*а*). Подавление колебания с частотой поднесущей несколько уменьшает наблюдаемую на изображении сетку.

Форма частотной характеристики полосового фильтра, выделяющего цветовую поднесущую с ее боковыми модуляционными полосами, определяется спектрами сигналов *R*—*W* и *B*—*W*. Если передаются цветоразностные сигналы *R*—*W* и *B*—*W*, то характеристика симметрична относительно частоты поднесущей. Если передаются сигналы *I* и *Q*, то, как мы уже указывали, в передатчике после модуляции поднесущей сигналом *I* производится частичное подавление верхней боковой модуляционной полосы (выше 0,5 *Мгц* от частоты несущей).

В связи с ассиметрией спектра сигнала u_1 характеристика фильтра имеет форму, изображенную на рис. 57,*б*. Это сделано для того, чтобы устранить искажения, которые могли бы возникнуть при детектировании сигнала с несимметричными боковыми модуляционными полосами; полосовой фильтр в области частот 0,5—1,5 *Мгц* ниже частоты поднесущей, имеет вдвое больший коэффициент пере-

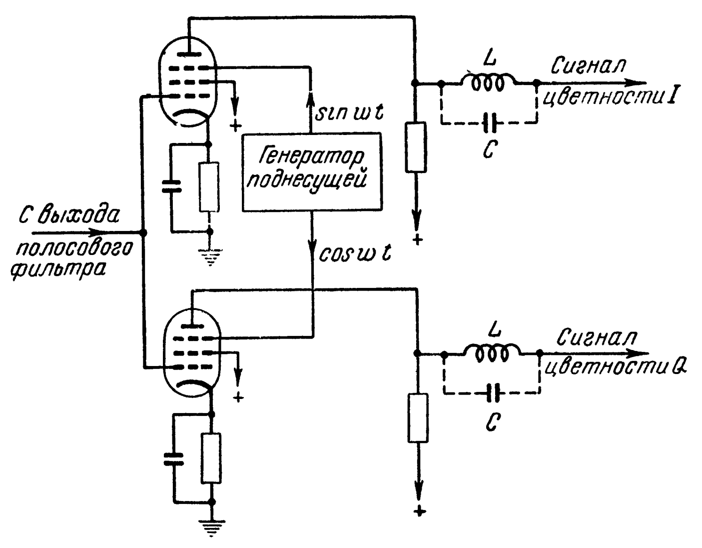


Рис. 58. Схема синхронного демодулятора.

дачи напряжения. Относительное увеличение этих составляющих как бы компенсирует их отсутствие в верхней половине спектра.

Синхронное детектирование или демодуляция, в результате которой выделяются исходные видеосигналы I и Q (или разностные сигналы $R—W$ и $B—W$), может быть осуществлено с помощью любого прибора с нелинейной зависимостью между током и подводимым напряжением. Чаще всего в демодуляторах используются пентоды, на управляющие сетки которых подводятся сигналы с выхода полосового фильтра, а на защитные сетки — колебания $u_г$ с частотой поднесущей от местного генератора (рис. 58).

Анодный ток лампы $i_а$ пропорционален произведению этих двух управляющих напряжений:

$$i_а = s u_x u_г,$$

где s — коэффициент пропорциональности, а $u_x = I \sin \omega t + Q \cos \omega t$*. В приемнике имеется два демодулятора; напряжения гетеродина, подводимые к демодуляторам, сдвинуты друг относительно друга по фазе на 90°, т. е. соответственно к лампам подводятся напряжения $U_г \sin \omega t$ и $U_г \cos \omega t$.

В одной схеме осуществляется преобразование вида

$$i_а = s(I \sin \omega t + Q \cos \omega t) U_г \sin \omega t = \frac{1}{2} s U_г (I - I \cos 2\omega t + Q \sin 2\omega t),$$

в другой же схеме анодный ток равен:

$$i_а = s(I \sin \omega t + Q \cos \omega t) U_г \cos \omega t = \frac{1}{2} s U_г (Q - Q \cos 2\omega t + I \sin 2\omega t).$$

Таким образом, анодный ток одной из ламп содержит видеочастотные составляющие, пропорциональные напряжению сигнала Q, а ток другой лампы — видеочастотные составляющие, пропорциональные напряжению сигнала I. Кроме того, токи содержат высокочастотные составляющие с удвоенной частотой поднесущей [1].

Нагрузки в анодных цепях ламп должны быть выбраны так, чтобы падение напряжения от высокочастотных составляющих токов оказалось пренебрежимо малым по сравнению с напряжением видеосигналов. Схема типичной нагрузки иллюстрируется рис. 58. Обычно катушка L подбирается так, чтобы при минимальной емкости C (паразитная емкость) собственная частота контура LC равнялась частоте поднесущей.

Выделенные таким образом видеосигналы I и Q подводятся далее к пересчетным схемам для образования разностных сигналов, где непосредственно выделяются напряжения, пропорциональные $R - W$ и $B - W$. Разумеется, если передаются цветоразностные сигналы, то эти пересчетные схемы отсутствуют. Цветоразностные сигналы

* Напряжение на выходе фильтра, как уже было указано ранее, содержит еще высокочастотные составляющие яркостного сигнала, которые в данном случае являются нежелательными, мешающими сигналами.

[1] Аналогичные результаты могут быть получены для сигналов $R - W$ и $B - W$.

далее складываются в определенном отношении и выделяется третий разностный сигнал $G—W$. Далее разностные сигналы складываются с яркостным сигналом, полученным с выхода видеоусилителя. Напряжения, пропорциональные R, G и B подводятся к управляющим электродам приемных трубок. Из схемы, приведенной на рис. 59, видно, как осуществляется пересчет сигналов.

В некоторых американских приемниках с целью известного упрощения демодуляцию осуществляют иначе. Имея в виду, что оси координатной системы $I—Q$ повернуты относительно осей координатной системы $(R—W)$ $(B—W)$ на 33°, сигнал на выходе полосового фильтра может быть выражен как

$$u_x = k_1(R - W)\cos(\omega t - 33°) + k_2(B - W)\sin(\omega t - 33°),$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты, получаемые при пересчете координат.

Если к демодуляторам, помимо напряжения u_x, подвести напряжения от гетеродина с соответствующими фазовыми сдвигами, т. е. к одной из ламп $U_г \sin(\omega t - 33°)$, а к другой лампе $U_г \cos(\omega t - 33°)$, то анодные токи ламп будут соответственно пропорциональны разностным сигналам $k_1(R - W)$ и $k_2(B - W)$.

Поскольку каждый из разностных сигналов выражается одновременно обоими сигналами (как I, так и Q), например, $R - W = 0{,}96I + 0{,}62Q$, приведенные соотношения справедливы лишь для гармонических составляющих видеосигналов, частоты которых ниже 0,5 *Мгц*, ибо составляющие сигнала Q с более высокими частотами отсутствуют, а сигнал I передается асимметричным модуляционным спектром.

Поэтому разностные сигналы, непосредственно выделенные в анодных цепях демодуляторов, в точности соответствуют своим оригиналам только для составляющих, передаваемых симметричным модуляционным спектром, т. е. лишь до 0,5 *Мгц*.

Таким образом, устранение схем пересчета сигналов I и Q в разностные достигается ценой некоторого ухудшения качества, что не имеет места в системе с передачей цветоразностных сигналов.

Правильная демодуляция цветовых сигналов возможна лишь при весьма точном соответствии частоты и фазы напряжения гетеродина номинальным значениям. Практиче-

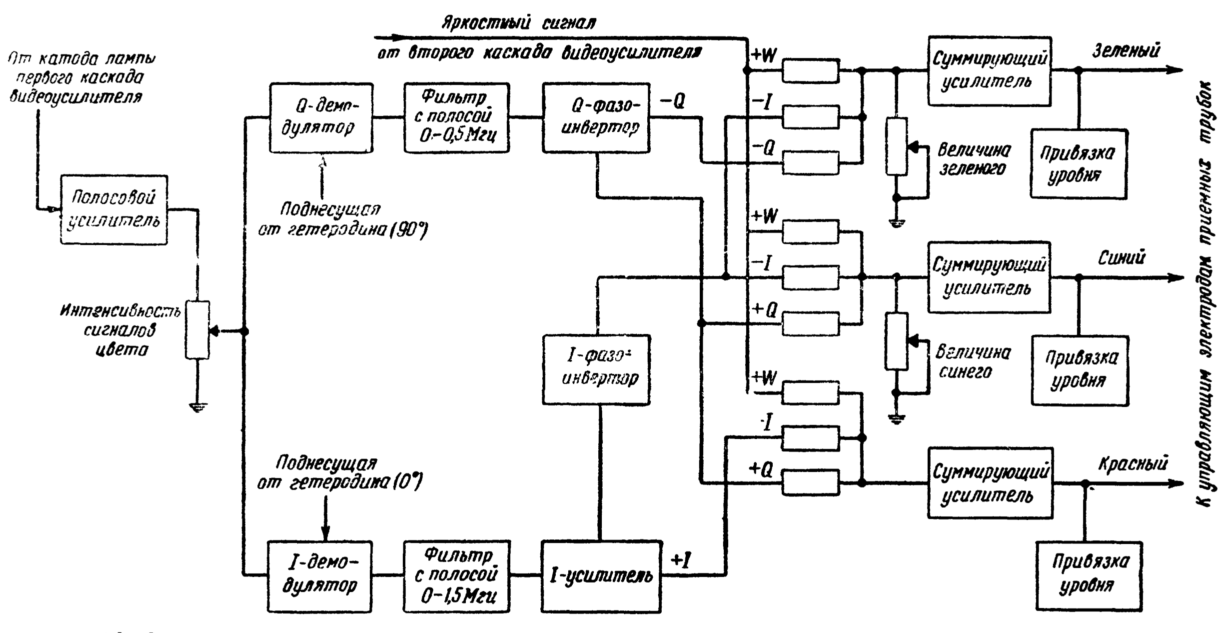


Рис. 59. Скелетная схема оконечного узла приемника системы с цветоразностными составляющими.

ски отклонение фазы от номинала порядка 5° ощущается наблюдателем как искажение цветового тона.

Поэтому местный генератор вспомогательного колебания с частотой поднесущей принудительно синхронизируется по частоте и по фазе импульсами высокочастотных колебаний, передаваемых во время обратного хода. Фаза колебаний цветовой синхронизации (рис. 56) строго фиксирована; так, в американской системе она отстоит от фазы вектора $B—W$ на 180°, т. е. соответствует передаче желтого цвета.

В приемнике имеются специальные схемы цветовой синхронизации и фазировки. Если частота и фаза колебания гетеродина отклоняется по каким-либо причинам от номинальных значений, то схемы, управляемые импульсами цветовой синхронизации, приведут снова частоту и фазу колебания к номинальным значениям.

В некоторых приемниках цветовая синхронизация осуществляется с помощью кристаллического (кварцевого) фильтра, собственная частота которого равна частоте поднесущей. Такая схема изображена на рис. 60. В цепь управляющей сетки лампы $Л_1$ вводится видеосигнал; лампа нормально заперта отрицательным смещением на сетку В промежутки времени прохождения импульса цветовой синхронизации лампа отпирается надлежащим образом сформированным импульсом положительной полярности, полученным от генератора строчной развертки.

В анодной цепи лампы $Л_1$ установлен колебательный контур с высокой добротностью, составным элементом которого является кварцевая пластинка *Кв*. Высокочастотные импульсы анодного тока ударно возбуждают контур. Так как добротность контура высока, то колебания не успеют сколько-нибудь существенно затухнуть за строчной интервал.

Непрерывные колебания контура вводятся в цепь катода следующей лампы $Л_2$ усилителя на триоде с заземленной сеткой. Подобная схема необходима для того, чтобы последующая цепь не вносила в контур заметного затухания.

Далее следует усилитель-ограничитель высокочастотных колебаний с лампой $Л_3$, анодная цепь которой индуктивно связана с колебательным контуром, настроенным также на частоту поднесущей. В контуре имеется реостат, изменение величины сопротивления которого приводит к изменению фазы снимаемого колебания. Таким образом,

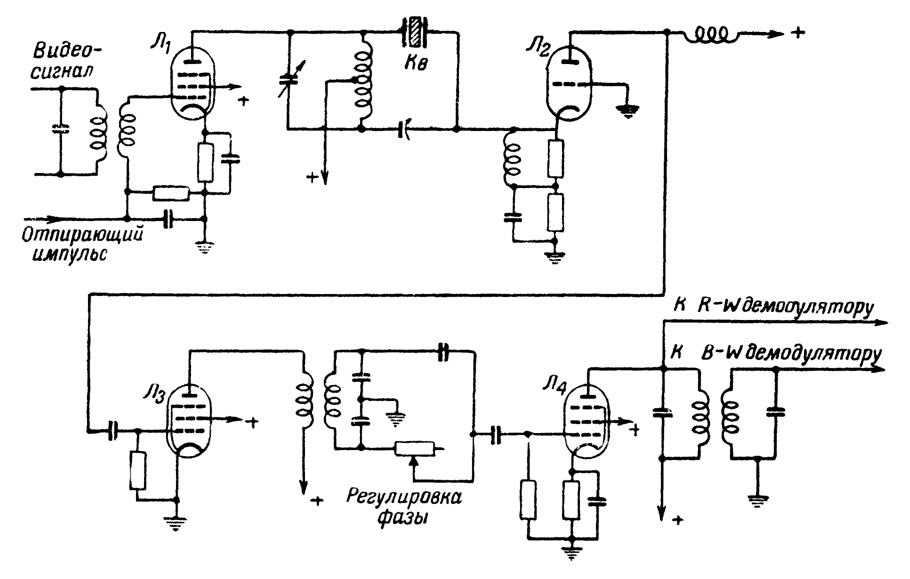


Рис. 60. Схема цветовой синхронизации с ударно возбуждаемым контуром

в этой схеме начальная установка фазы производится вручную.

Затем колебания подводятся к сетке усилительной лампы $Л_4$, в анодной цепи которой установлены два связанных колебательных контура. Колебания, снимаемые с таких контуров, как известно, сдвинуты друг относительно друга на 90°. Эти колебания используются соответственно в демодуляторах цветоразностных сигналов.

Описанная схема обладает тем недостатком, что выбор основного колебательного контура с высокой добротностью, требуемой для малой подверженности влиянию импульсных и флуктуационных помех, не может быть осуществлен, ибо схема становится весьма критичной к изменению частоты управляющих колебаний. При высокой добротности контура, т. е. при очень острой резонансной кривой, уже достаточно малое несовпадение частот управляющих колебаний и резонансной частоты контура приводит к выходу из синхронизма.

Схема, изображенная на рис. 61, дает значительно лучшие результаты в работе. Основными элементами этой схемы являются: генератор с самовозбуждением (лампа ($Л_1$) и фазовый детектор (лампа $Л_4$).

Составным элементом сеточного колебательного контура генератора является так называемая реактивная лампа $Л_2$. Известно, что электронная лампа, установленная в схему, представляет собой для этой схемы некоторую активную и реактивную нагрузку. Реактивность лампы оказывается особенно существенной при наличии заметной проходной емкости (между анодом и управляющей сеткой).

Лампа $Л_2$ в рассматриваемой схеме является пентодом; для увеличения проходной емкости между анодом и управляющей сеткой включен конденсатор. Она подключена параллельно сеточному колебательному контуру, поэтому результирующая емкость контура определяется не только конденсатором и паразитными емкостями, но и емкостью реактивной лампы.

Важным свойством реактивной лампы является зависимость реактивных параметров от потенциала управляющей сетки. Поэтому при изменении потенциала сетки меняется емкость контура, а следовательно, и частота генерируемых колебаний.

Фазовый детектор является схемой, задающей на сетку реактивной лампы управляющее напряжение. В нем

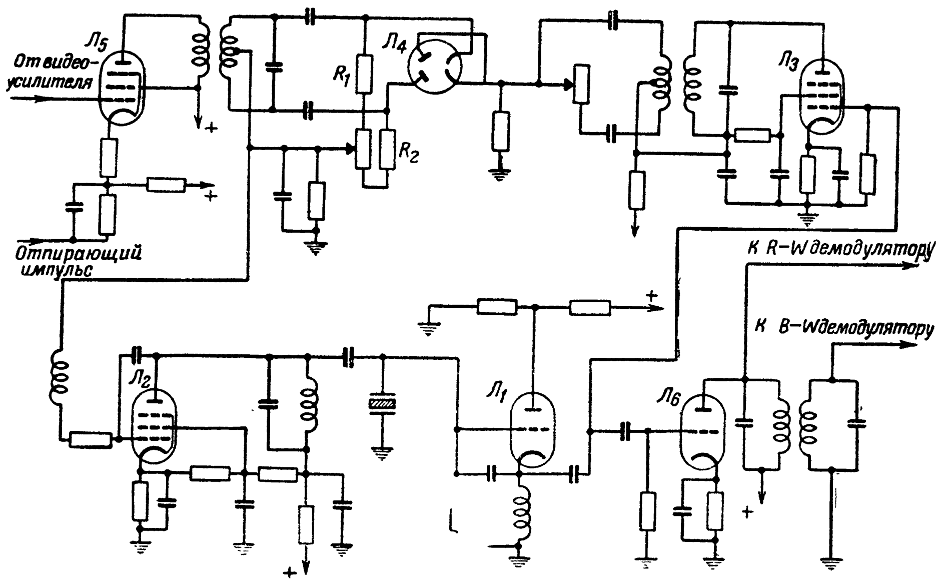


Рис. 61. Схема цветовой синхронизации с автоматической регулировкой фазы

производится сравнение колебаний генератора, подводимых к детектору, после усиления этих колебаний лампой $Л_3$ и колебаний цветовой синхронизации, подводимых к схеме, после усиления их лампой $Л_5$.

Если частоты и фазы сравниваемых колебаний совпадают, то токи диодов, протекающие через сопротивления R_1 и R_2, равны друг другу и результирующее падение напряжения на суммарном сопротивлении равно нулю. Если фаза одного из колебаний изменится, то изменяются проводимости диодов; ток одного из диодов увеличивается, а другого уменьшается и на сопротивлении образуется падение напряжения, величина и знак которого зависят от величины и знака взаимного изменения фазы сравниваемых колебаний.

Напряжение ошибки управляет лампой $Л_2$, а следовательно, и частотой генерируемых колебаний. Частота генератора будет изменяться до тех пор, пока напряжение ошибки не станет равным нулю, т. е. пока частоты и фазы сравниваемых колебаний не станут равными друг другу.

Таким образом осуществляется автоматическая фазировка колебаний гетеродина цветовой поднесущей в приемнике.

Одним из недостатков описанной системы цветного телевидения является наличие поднесущей, модулированной как по фазе, так и по амплитуде. Помимо того, что при детектировании такого колебания имеют место специфические искажения, в состав приемника входят схемы синхронных детекторов, требующих для работы высокостабильного по частоте и по фазе колебания, создаваемого местным генератором. Это приводит к усложнению приемников.

Поэтому проводится разработка других систем, сходных в описанной, в которых передача цветовых сигналов (или их формирование) осуществляется иначе.

В одной из таких систем передача двух цветовых сигналов производится путем модуляции двух поднесущих. Частотные спектры промодулированных поднесущих расположены внутри спектра яркостного сигнала, не перекрывая друг друга (рис. 62,*б*).

На передающем конце системы из трех сигналов одновременной камеры формируется яркостный сигнал высокой четкости. «Красный» и «синий» сигналы, кроме то-

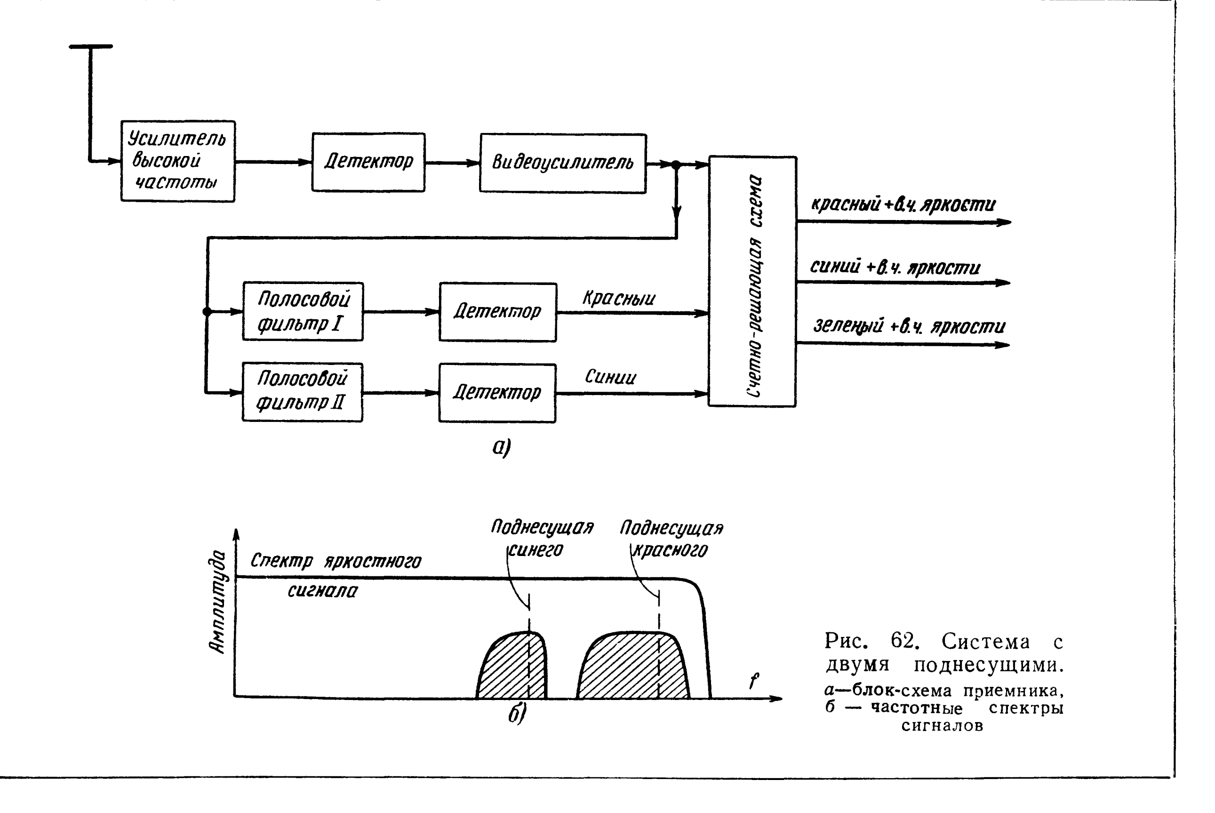


Рис. 62. Система с двумя поднесущими.
а—блок-схема приемника, *б* — частотные спектры сигналов

го, ограничиваются по частоте в соответствии с худшей разрешающей способностью глаза к этим цветам. Затем каждый из этих двух сигналов независимо модулирует поднесущие. Частоты поднесущих не равны друг другу, но каждая из частот кратна нечетному числу половин строчной частоты. Эти частоты ниже граничной частоты спектра яркостного сигнала.

Промодулированные поднесущие колебания складываются в суммирующей схеме с яркостным видеосигналом, и результирующее напряжение поступает далее на модулятор радиопередатчика.

Принятые приемником сигналы после детектирования и усиления подаются к матричной схеме и, кроме того, подводятся ко входам двух полосовых фильтров (рис. 62,*а*) .Первый полосовой фильтр выделяет из всего спектра участок, в котором расположена поднесущая, промодулированная «красными» сигналами, и соответствующий спектр модуляционных частот. Второй фильтр выделяет поднесущую, промодулированную «синими» сигналами, с соответствующим модуляционным спектром.

Далее выделенные сигналы детектируются, и полученные на выходах детекторов «красные и «синие» сигналы также подводятся к матричной схеме. В последней путем вычитания из яркостного сигнала «красного и «синего» формируется «зеленый» сигнал. Кроме того ко всем трем сигналам («красному», «синему» и «зеленому») примешиваются высокочастотные составляющие яркостного сигнала. Полученные колебания управляют оконечным устройством, например трубкой с теневой маской.

Рассмотрим подробнее еще одну систему цветного телевидения, находящуюся в опытной разработке.

11. КОДОВАЯ СИСТЕМА

Кодовая система цветного телевидения отличается от системы с передачей разностных составляющих только способом формирования и обратного преобразования сигнала цветовой информации. Эта система, также как и предыдущая, является одновременной с независимой передачей яркостной информации, т. е. совместима с черно-белым телевидением.

Принципиально, в кодовой системе отмеченные выше недостатки устраняются ценой некоторого ограничения числа цветовых оттенков изображения, связанного с ограниченной разрешающей способностью любой системы

связи по амплитуде. Наличие флуктуационных помех не позволяет уверенно различать изменение амплитуды, меньшее некоторого определенного значения.

Физиологами установлено, что глаз может различить несколько тысяч цветовых оттенков, отличающихся цветовым тоном и насыщенностью. Условия, в которых производились опыты по определению цветовой различительной способности глаза, были тщательно разработаны так, чтобы выяснить предельные возможности глаза.

Наблюдатели длительное время подготавливались к условиям опыта. Сравниваемые цвета рассматривались под такими углами, при которых цветовая чувствительность максимальна. Посторонние яркостные детали отсутствовали в поле зрения. Все факторы, рассеивающие внимание наблюдателя, например звуки, устранялись и т. д.

Понятно, что при рассматривании телевизионного изображения условия совсем иные. Если поставить аналогичные опыты в условиях, приближающихся к телевизионным, то окажется, что наблюдатель уверенно различает лишь несколько десятков оттенков, отличающихся по цветовому тону и по насыщенности.

Указанный факт и явился основой построения кодовой системы цветного телевидения. При разработке системы выбирают комплект фиксированных цветов, достаточных для качественной окраски четкого черно-белого изображения, как это, например, сделано на цветовом графике, изображенном на рис. 63. Цветовой треугольник *RGB* разбит на 30 зон, внутри каждой зоны кружком отмечена фиксированная точка; будем называть эти точки кодовыми.

Любая возможная цветность в этой системе воспроизводится цветностью ближайшей кодовой точки. Каждой кодовой точке соответствует определенное значение кодового электрического сигнала. Так, например, цветности, расположенные в 18-й зоне, воспроизводятся электрическим сигналом в 18 *в*, цветности 5-й зоны — сигналом в 5 *в* и т. д.

Этот кодовый сигнал передается к приемнику и преобразуется в цвет кодовой точки соответствующей зоны.

Если происходят изменения цветности внутри некоторой зоны, то такие изменения на экране приемника не воспроизводятся.

Передатчик рассматриваемой системы должен быть снабжен устройством, преобразующим сигналы *R*, *G* и *B*,

полученные на выходе передающей камеры, в кодовый сигнал соответствующей зоны передаваемого цвета. Приемник системы должен быть снабжен устройством, осуществляющим обратное преобразование.

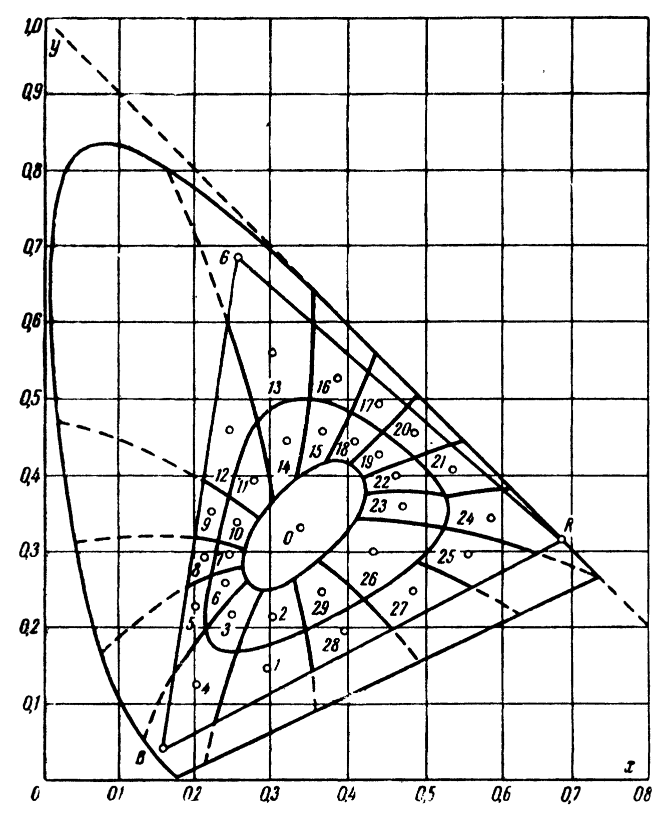


Рис. 63. Цветовой график, разделенный на кодируемые зоны.

Положение кодовой точки в общем случае определяется тремя независимыми переменными *R*, *G* и *B* или какими-нибудь другими тремя переменными, характеризующими цвет объекта. Условие совместимости с черно-белым телевидением и целесообразности передачи мелких деталей бесцветными диктует выбор одной из переменных — это яркостный сигнал *W*. В этом случае, как и в предыдущей системе, удобно выбрать две другие переменные в виде сигналов *R*—*W* и *B*—*W*.

Разностные сигналы не определяют яркости изображения, а только его цветность. Это нужно понимать в том смысле, что если W остается постоянным, а изменяются лишь $R—W$ и $B—W$, то такие изменения не вызывают изменения субъективной яркости изображения, а только меняют его цветность. Однако если меняется яркость изображения без изменения его цветности, то все три сигнала изменяются в одинаковое число раз. Это положение иллюстрируется, графиками напряжений при передаче красного и темно-красного цветов, приведенными на рис. 46.

Для того чтобы упростить задачу кодирования (свести ее по аналогии с геометрией к плоскостной задаче), нужно сделать сигналы $R—W$ и $B—W$ абсолютно не зависимыми от яркости. Это можно сделать, если, учитывая высказанные выше положения, разделить каждый из сигналов на W.

Теперь, независимо от яркости передаваемого объекта величины $\frac{R-W}{W}$ и $\frac{B-W}{W}$ всегда будут лежать в одной плоскости цветового графика, в так называемой плоскости единичной яркости ($Y=1$), изображенной на рис. 48. При создании кодирующего устройства нужно внутри треугольника основных цветов, изображенного на указанной плоскости, обозначить выбранные зоны постоянных цветностей.

Деление одной переменной электрической величины на другую выполняют специальные электронные схемы или электронно-лучевые трубки. Эти схемы значительно сложнее потенциометрических матричных схем, вычисляющих разности сигналов и их доли. Однако подобное счетно-решающее устройство входит в состав передатчика, т. е. является уникальным устройством в системе вещания, и потому его сложность и стоимость не имеют особого значения.

Задача кодирования теперь сводится к двум операциям. Первая из них — преобразование непрерывных изменений двух сигналов в сведения о номере зоны, которой соответствуют их мгновенные значения. Вторая задача — преобразование сведений о номере зоны в определенный кодовый сигнал согласно специально разработанной шкале.

Обе задачи могут быть выполнены с помощью довольно простого по принципу работы прибора. Этот прибор состо-

ит из электронно-лучевой трубки, транспаранта и фотоэлемента (рис. 64). На отклоняющие пластины трубки подаются напряжения, пропорциональные $\frac{R-W}{W}$ и $\frac{B-W}{W}$, под действием которых отклоняется электронный пучок постоянной интенсивности, а значит, и светящееся пятно на экране. Таким образом поверхность экрана является плоскостью, в которой осуществляется кодирование, напри-

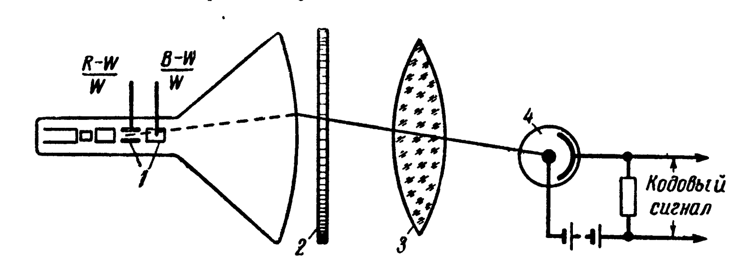


Рис. 64. Кодирующее устройство.
1 — отклоняющие пластины; 2 — транспарант с зонами различной прозрачности, 3 — объектив; 4 — фотоэлемент

мер плоскостью единичной яркости, и положение пятна на экране определяет цветность передаваемого в данный момент участка объекта.

На транспаранте в масштабе, соответствующем чувствительности трубки, наносится треугольник *RGB* с зонами «постоянной» цветности. Транспарант сделан полупрозрачным, причем прозрачность от зоны к зоне меняется. Так, например, прозрачность 1-й зоны составляет 3%, второй — 6%, третьей — 9% и т. д.

Очевидно, что пропущенный через транспарант световой поток от пятна будет ослаблен, причем величина ослабления зависит от зоны, в которой находится в данный момент времени пятно. Для каждой зоны ослабление света строго фиксировано. Световой поток, прошедший через транспарант, падает на фотоэлемент и преобразуется в электрический (видео-)сигнал $U_к$.

Существенное значение имеет построение кодовой шкалы. Можно кодировать зоны не в таком порядке, какой приведен в примере, а в любом другом; все зависит от того, как разместить последовательно увеличивающиеся прозрачности. Например, можно выполнить транспарант и так: прозрачность первой зоны — 3%, пятой — 6%, десятой — 9%, второй — 12% и т. д., и тогда напряжение

в 1 *в* соответствует передаче красного цвета, 2 *в* — синего, 3 *в* — оранжевого и т. д.

Подобные хаотические шкалы, конечно, не являются наилучшими. Сигнал, передаваемый по каналу связи, под влиянием помех может измениться и тогда вместо 1 *в* в приемнике выделится сигнал в 2 *в*, т. е. вместо синего цвета изображение воспроизведется в красном цвете. Поэтому кодовая шкала должна быть построена так, чтобы соседним дискретным значениям напряжения соответствовали субъективно сходные цветности, например, в последовательности номеров зон, обозначенных на рис. 63.

Больше того, число кодируемых зон должно быть значительно бо́льшим числа ступенек, достоверно передаваемых по среднему каналу связи, и тогда зрители, приемники которых находятся в лучших условиях, например ближе к станции, будут обеспечены лучшей цветопередачей.

Описанный кодирующий прибор содержит два промежуточных преобразования—люминесцентное и фотоэлектрическое. Энергия электронного пучка превращается в свет, а затем промодулированный свет превращается в изменение фототока. Эти преобразования связаны с неизбежными потерями (порядка 99%). Но дело даже не в количественных соотношениях. Преобразования неизбежно связаны с ухудшением сигнала помехами (неравномерность свечения экрана, послесвечение, флуктуации фототока и т. п.), снижающими уже в передатчике число возможных градаций кодового сигнала.

Для устранения промежуточных преобразований было предложено электронное устройство, не содержащее этих преобразований. Кодирующая трубка содержит обычный электронный прожектор и две пары отклоняющих пластин. В противоположном прожектору конце трубки установлен транспарант, аналогичный описанному оптическому, только обладающий различной прозрачностью для электронов. Транспарант составлен из отдельных участков мелкоструктурной металлической сетки с различной густотой в разных зонах.

Структура сетки такова, что на сечение электронного пучка приходится много ее ячеек, и потому при изменении положения электронного пучка внутри зоны количество пропущенных электронов практически остается постоянным.

Таким образом, осуществляется модуляция плотности

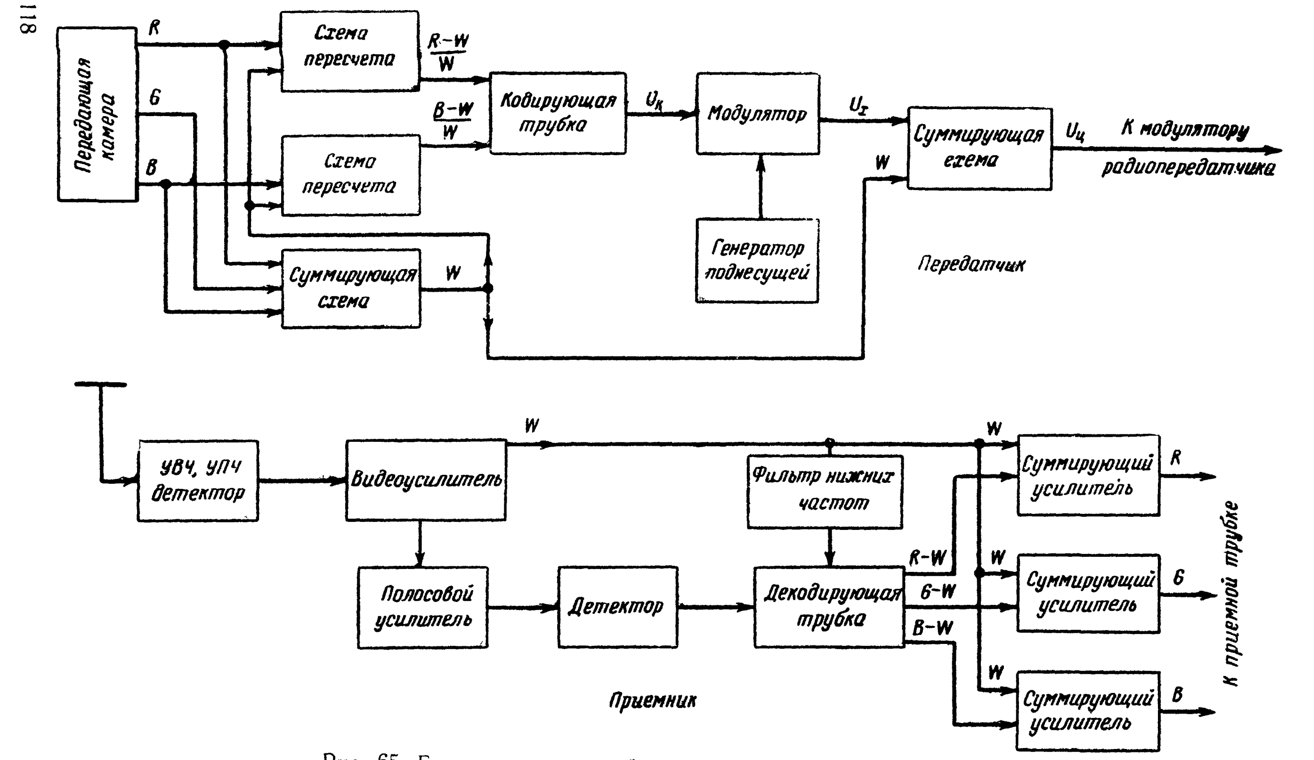
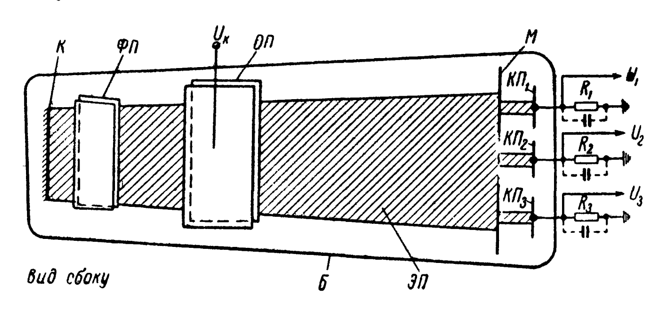


Рис. 65. Блок-схема кодовой системы цветного телевидения.

электронного пучка в зависимости от его положения в той или иной зоне. Далее пропущенные электроны попадают на коллектор и ток, протекая по нагрузочному сопротивлению, создает падение напряжения — кодовый сигнал $U_к$.

Оба сигнала (кодовый $U_к$ и яркостный W) передаются по каналу связи любым способом — либо независимо, ли-



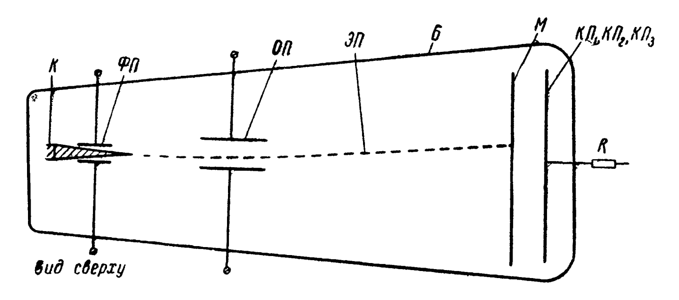


Рис. 66. Схематическое изображение декодирующей трубки.

Б — баллон; *К* — катод; *ФП* — фокусирующие пластины; *ОП* — отклоняющие пластины; *М*—маска с вырезами; $КП_1$, $КП_2$ и $КП_3$— коллекторные пластины, R_1, R_2 и R_3 — нагрузочные сопротивления; $U_К$ — кодовое напряжение; U_1, U_2 и U_3 — декодируемые сигналы

бо в одном частотном диапазоне подобно тому, как передаются сигналы W и u_x в предыдущей системе.

Выделенный в приемнике яркостный сигнал подводится одновременно к суммирующим схемам и декодирующему устройству, куда поступает также и выделенный кодовый сигнал (рис. 65).

Декодирующая электронная трубка (рис. 66) содержит электронный прожектор, создающий равномерный по сечению электронный пучок *ЭП* н о ж е в и д н о й ф о р м ы

(сечение — узкий прямоугольник). Электронный пучок, формируясь в прожекторе, проходит между отклоняющими пластинами, на которые подан кодовый сигнал $U_к$. Таким образом, отклонение пучка пропорционально мгновенному значению кодового сигнала и, значит вполне определенной зоне цветового графика.

Пучок далее на своем пути встречает маску, плоскость которой перпендикулярна оси трубки. В маске сделаны три ряда вырезов. Конфигурация вырезов каждого ряда соответствует относительному содержанию в цветности данной кодовой точки трех основных цветов. Так, в первом ряду (от одного крайнего положения к другому) высота выреза изменяется соответственно содержанию красного цвета в первой точке, затем во второй и т. д. Второй ряд вырезов отражает содержание синего цвета и третий — зеленого. Таким образом, высоты вырезов пропорциональны соответственно трехцветным коэффициентам (рис. 67).

За вырезами расположены три коллекторные пластины так, что каждый из трех пропущенных маской электронных пучков попадет всегда на свою пластину. Во внешних цепях коллекторных пластин включены нагрузочные сопротивления. Протекающий через них ток создает падения напряжений, пропорциональные соответственно $\frac{R}{W}$, $\frac{B}{W}$ и $\frac{G}{W}$ $\left(\text{или сигналам } \frac{R}{W}-1, \frac{B}{W}-1 \text{ и } \frac{G}{W}-1,\right.$ если отнять от каждого из вышеуказанных сигналов постоянную величину 1, поменяв, например, местами вырезы и непрозрачные участки каждого ряда$\left.\right)$.

Для получения исходных сигналов R, G и B (или $R—W$, $B—W$ и $G—W$) нужно умножить мгновенные значения относительных сигналов на мгновенное значение яркостного сигнала. Такое умножение можно получить в той же декодирующей трубке, подав на управляющий электрод прожектора сигнал W. Плотность электронного пучка, а значит, и ток, пропущенный каждым из вырезов, будут тогда пропорциональны еще и напряжению сигнала W.

Поскольку в системе передается широкополосный яркостный сигнал W, сигнал цветности $U_к$ на передатчике ограничивается по ширине спектра. Поэтому по соображениям удобства использования сигналов в оконечном устройстве приемника их целесообразнее выделять

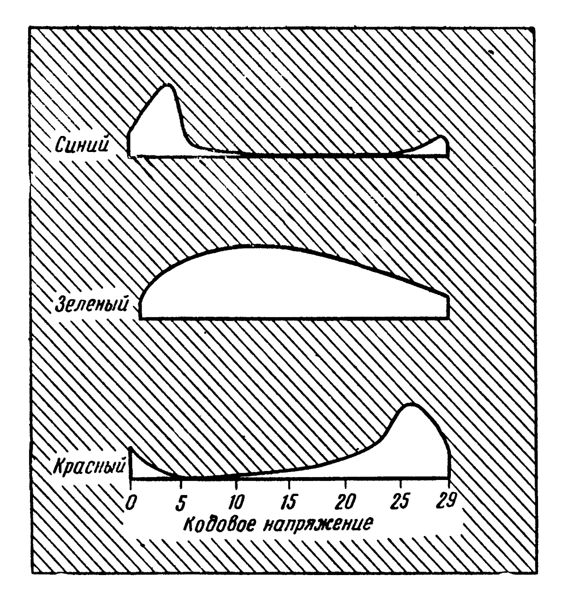


Рис. 67. Форма маски декодирующей трубки.

в виде $R - W$, $B - W$ и $G - W$ и дальше использовать так же, как в системе с передачей цветоразностных составляющих.

Число достоверно воспроизводимых оттенков цвета в этой системе в конечном итоге определяется мощностью передатчика. Это существенное ее достоинство, ибо повышение качества цветопередачи не требует усложнения приемника.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры системы опытного цветного телевизионного вещания в Москве

Параметры	Их значения
Координаты основных цветов приемника в системе МКО	Цвет — x — y Красный (R) 0,67 0,33 Зеленый (G) 0,21 0,71 Синий (B) 0,14 0,08
Равносигнальный белый цвет в телевизионном изображении	Цвет источника B (цветовая температура 4 800° К) Координаты в системе МКО: $x = 0{,}348$; $y = 0{,}352$
Сигнал яркости U_W передается в полной полосе видеочастот стандарта *OIR* (6 *Мгц*) способом амплитудной модуляции несущей частоты радиопередатчика соответствующего канала телевизионного вещания	В соответствии с координатами основных цветов и равносигнального белого „B“ образование яркостного сигнала U_W из сигналов основных цветов U_R, U_G и U_B определяется уравнением $U_W = 0{,}334\,U_R + 0{,}585\,U_G + 0{,}081\,U_B$.
В качестве сигналов цветности передаются разностные сигналы $U_{(R-W)}$ и $U_{(B-W)}$	В соответствии с координатами основных цветов и равносигнального белого „B“ сигналы цветности определяются уравнениями $U_{(R-W)} = 0{,}666\,U_R - 0{,}585\,U_G - 0{,}081\,U_B$; $U_{(B-W)} = 0{,}334\,U_R - 0{,}585\,U_G + 0{,}919\,U_B$. Сигналы цветности от данного элемента изображения должны совпадать с сигналом яркости от этого же элемента с точностью до 0,03 *мксек*
Сигналы цветности передаются двумя равными боковыми полосами частот квадратурно-модулированного колебания одной поднесущей частоты, помещаемыми вместе с сигналом яркости в видеоспектр стандарта *OIR* (6 *Мгц*)	Сигналы цветности передаются равными полосами 1,57 *Мгц*. При передаче белого „B“ сигналы цветности должны быть по крайней мере на 40 *дб* ниже размаха видеосигнала яркости от белого до черного. Сигнал цветности при передаче насыщенных цветов не должен превышать номинальный

Параметры	Их значения
	уровень черного и белого больше чем 35 % сигнала яркости от белого до черного
Поднесущая частота должна быть постоянной, жестко связанной с частотой строк и равна 567-й гармонике половинной строчной частоты стандарта *OIR*	Номинальное значение поднесущей частоты составляет 4 429 687,5 ± 10 *гц*. Максимальная скорость изменения частоты не должна превышать 0,1 *гц* в секунду
Характеристика передачи всего телевизионного тракта, включая приемник, должна приближаться к линейной. Оптимальное значение показателя степени общей характеристики передачи γ в связи с разбросом модуляционных характеристик приемных трубок уточняется в зависимости от типа применяемых трубок	При современном состоянии цветного телевидения не рекомендуется устанавливать допуски на величину показателя γ
Полный видеосигнал системы цветного телевидения должен удовлетворять стандарту, за исключением следующих случаев:	Полный сигнал цветного изображения имеет следующий состав: $U_ц = U_W + U_{(R-W)} \cos \omega t + \frac{1}{2,7} U_{(B-W)} \sin \omega t.$
1. В спектр видеосигнала вводится на поднесущей сигнал цветности 2. Для восстановления колебаний поднесущей частоты в приемнике после строчного синхронизирующего импульса на гасящем импульсе помещается так называемая цветовая вспышка, представляющая собой минимум 10—12 периодов колебаний поднесущей частоты. Во время действия уравнивающих и кадровых синхроимпульсов сигнал вспышки не излучается. При этом не менее 13 цветовых вспышек должно излучаться после задних уравнивающих импульсов до конца кадрового гасящего импульса	Опорной фазой в приведенном уравнении является фаза вспышки + 180°. Фазовые углы поднесущей, измеренные по отношению к фазе вспышки, при воспроизведении насыщенных основных цветов и дополнительных к ним при 75 % полной амплитуды должны поддерживаться в пределах ± 20 % от величин, определяемых уравнением полного сигнала. Размах вспышки равен 0,9 размаха синхроимпульсов и должен поддерживаться в пределах ± 15 %.

Продолжение

Параметры	Их значения
3. Номинальный уровень черного не должен зависеть от содержания изображения	Номинальный уровень черного должен быть, независимо от содержания изображения, ниже уровня гасящих импульсов на 75 ± 2,5 % от размаха между вершиной гасящих импульсов номинальным уровнем белого
Стабильность частоты радиопередатчика и разноса между несущими звука и изображения	Несущая частота радиопередатчика изображения должна поддерживаться равной установленной номинальной величине для данного телевизионного канала со стабильностью ± 1 000 *гц*, разнос между несущими звука и изображения должен соответствовать стандарту *OIR* и поддерживаться постоянным со стабильностыо ± 1 000 *гц*
Закон изменения группового времени задержки огибающей сигнала, излучаемого радиопередатчиком, должен быть определенным	При подаче на вход радиопередатчика синусоидального напряжения, частота которого меняется от 50 *кгц* до 6 *Мгц*, на выходе радиопередатчика ему должен соответствовать сигнал, время групповой задержки которого (относительно средней задержки между частотами от 50 до 200 *кгц*) должно быть равно нулю для частот до 4,2 *Мгц* и затем линейно уменьшаться так, чтобы на частоте 6 *Мгц* задержка была равна 0,3 *мксек*. На частоте поднесущей 4,43 *Мгц* допуск на точность задержки дожен быть не более ±0,05 *мксек*. При изменении частоты в диапазоне от поднесущей до 2,5 *Мгц* допуск линейно увеличивается до ± 0,1 *мксек*; при дальнейшем изменении частоты до 0,2 *Мгц* допуск остается равным ± 0,1 *мксек*. В диапазоне от поднесущей до 6 *Мгц* допуск также линейно увеличивается до ± 0,1 *мксек*

ЛИТЕРАТУРА

Зворыкин В. К., Мортон Д. А., Телевидение, Изд. иностранной литературы, 1956.

Кайвер М. С., Основы цветного телевидения, Изд. иностранной литературы, 1957.

Крейцер В. Л., Совместимые смешанные системы цветного телевидения, «Техника кино и телевидения», 1959, № 1.

Салгус К. К., Принципы построения совместимых систем цветного телевидения, Госэнергоиздат, 1959.

Сборник трудов, Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1957, вып. 11/32 (посвящен вопросам построения цветоразностной системы цветного телевидения, ответственный редактор проф. П. В. Шмаков).

Шмаков П. В., Цветное телевидение, Госэнергоиздат, 1948.

Шмаков П. В., Основы цветного и объемного телевидения, «Советское Радио», 1954.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

Глава первая. **Основы учения о цветах** 7

1. Физическая сущность и восприятие цвета 7
2. Смешение цветов 12
3. Цветовое зрение 17
4. Измерение цвета 22

Глава вторая. **Принципы цветного телевидения** 32

5. Возможность осуществления цветного телевидения . . . 32
6. Одновременная и последовательная системы 39
7. Передающие приборы 47
8. Приемные трубки 56

Глава третья. **Системы цветного телевидения** 71

9. Система с последовательной сменой цветов по полям . . 72
10. Одновременная система с передачей цветоразностных составляющих 78
11. Кодовая система 112

Приложение. Параметры системы опытного цветного телевизионного вещания в Москве 122

Литература 125

К НАШИМ ЧИТАТЕЛЯМ

Огромный размах телевидения, намеченный симилетним планом, бурно растущее количество телезрителей и широкое развитие радиолюбительства в нашей стране требуют увеличения числа книг по вопросам телевидения.

Редакция Массовой радиобиблиотеки Госэнергоиздата ежегодно увеличивает тиражи своих изданий, и для некоторых брошюр по телевидению они достигли уже двухсот тысяч экземпляров. Но широта охвата тематики еще не обеспечивает растущих требований наших читателей. Диапазон их интересов очень широк.

Книги по вопросам телевидения нужны и для неискушенного в технике телезрителя, только что купившего телевизор, для радиолюбителей разной степени подготовки и для студентов и специалистов.

Поэтому важно выявить запросы всех наших читателей, чтобы составить перспективный план Массовой радиобиблиотеки по телевизионной технике.

За последние два года по вопросам телевидения в Массовой радиобиблиотеке были изданы следующие брошюры и книги:

Акулиничев И. Т., **Любительский телевизор**, вып. 298, 48 стр., 75 000 экз., ц. 1 р. 10 к.

Ангафоров А. Н., **Приемные трубки для цветного телевидения**, вып. 304, 16 стр., 65 000 экз., ц. 35 коп.

Бялик Г. И. и Богатов Г. Б., **Прикладные телевизионные установки**, вып. 320, 54 стр., 50 000 экз., ц. 1 р. 40 к.

Загик С. Е. и Капчинский Л. М., **Приемные телевизионные антенны**, изд. второе, переработанное, вып. 306, 80 стр., 100 000 экз., ц. 1 р. 95 к.

Купревич Н. Ф., **Телевизионная техника в астрономии**, вып. 313, 40 стр., 30 500 экз., 90 коп.

Пилтакян А. М., **Одиннадцатиламповый телевизор**, вып. 295, 32 стр., 95 000 экз., ц. 75 коп.

Сотников С. К., **Сверхдальний прием телевидения**, вып. 312, 64 стр., 50 000 экз., ц. 1 р. 50 к.

Самойлов Г. П., **Развертывающие устройства в телевизорах и их неисправности**, вып. 290, 72 стр., 50 000 экз., ц. 1 р. 60 к.

Ельяшкевич С. А., **Проверка ламп в телевизорах**, изд. второе, дополненное, вып. 329, 64 стр., 165 000 экз., ц. 1 р. 30 к.

Загик С. Е. и Капчинский Л. М., **Коаксиальные кабели**, вып. 324, 40 стр., 30 000 экз., ц. 1 р. 15 к.

Ломозова Н. З. и Левин С. Д., **В помощь телезрителю**, вып. 341, 64 стр., 200 000 экз., ц. 1 р. 60 к.

Тех товарищей, которые захотят воспользоваться этим списком, чтобы выписать книги, просим учесть, что книги Массовой радиобиблиотеки за прошлые годы полностью распроданы.

Рекомендуем выписывать книги только по плану текущего года.

Госэнергоиздат книги не высылает.

Выписывать книги можно только через «Книга — почтой». Заказы можно направлять: г. Москва, В-218, 5-я Черемушкинская, 14, книжный магазин № 93 «Книга — почтой» или Москва, Петровка, 15, магазин технической книги № 8, отдел «Книга — почтой».

НА 1960 г. ЗАПЛАНИРОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ ИЗДАНИЯ

Акуличичев И. Т., **Любительский телевизор,** изд. второе по измененной и улучшенной конструкции телевизора.

Богатов Г. Б. и Бялик Г. И., **Проблемы современного телевидения.**

Ельяшкевич С. А, **Устранение неисправностей в телевизоре,** изд. третье, переработанное.

Загик С. Е. и Капчинский Л. М., **Телевизионные антенны,** третье переработанное издание.

Самойлов Г. П., **Развертывающие устройства в телевизорах и их неисправности,** изд. второе, переработанное.

Самойлов Г. П., **Уход за телевизором.**

Сотников С. К., **Сверхдальний прием телевидения,** изд. второе, переработанное.

Федоров Л. В., **Телевизионная аппаратура на Выставке достижений народного хозяйства.**

Для составления перспективного плана Массовой радиобиблиотеки по вопросам телевидения мы просим читателей вносить свои предложения об издании новых брошюр и книг по телевизионной технике, а также по переизданию выпусков Массовой радиобиблиотеки, издававшихся в последние годы.

Ваши письма направляйте по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат — Редакция Массовой радиобиблиотеки

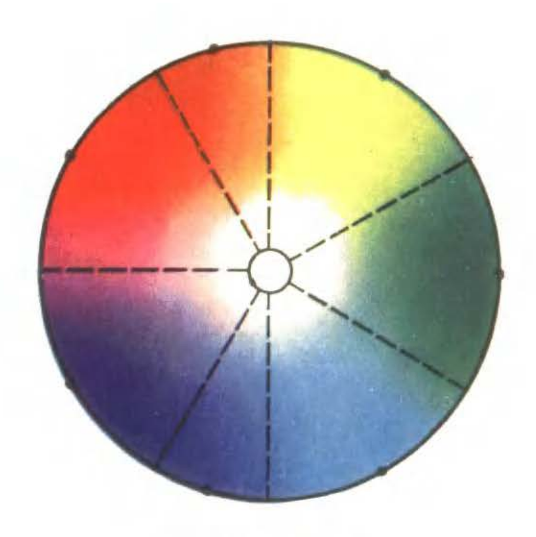


Рис. 3. Круг Ньютона.

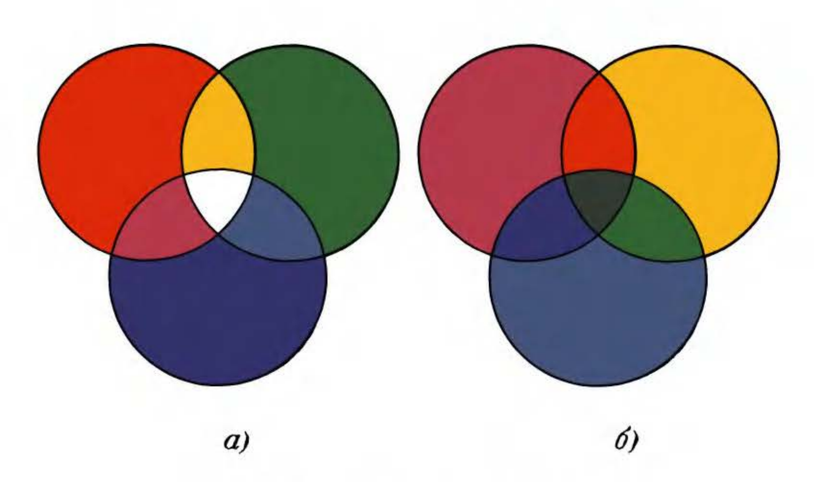


Рис. 5. Результаты смешения цветов.

а — слагательного (аддитивного); б — вычитательного (субтрактивного).

Рис. 8. Пространственное смешение.

С некоторого расстояния глаз наблюдателя перестает раздельно различать отдельные цветные элементы

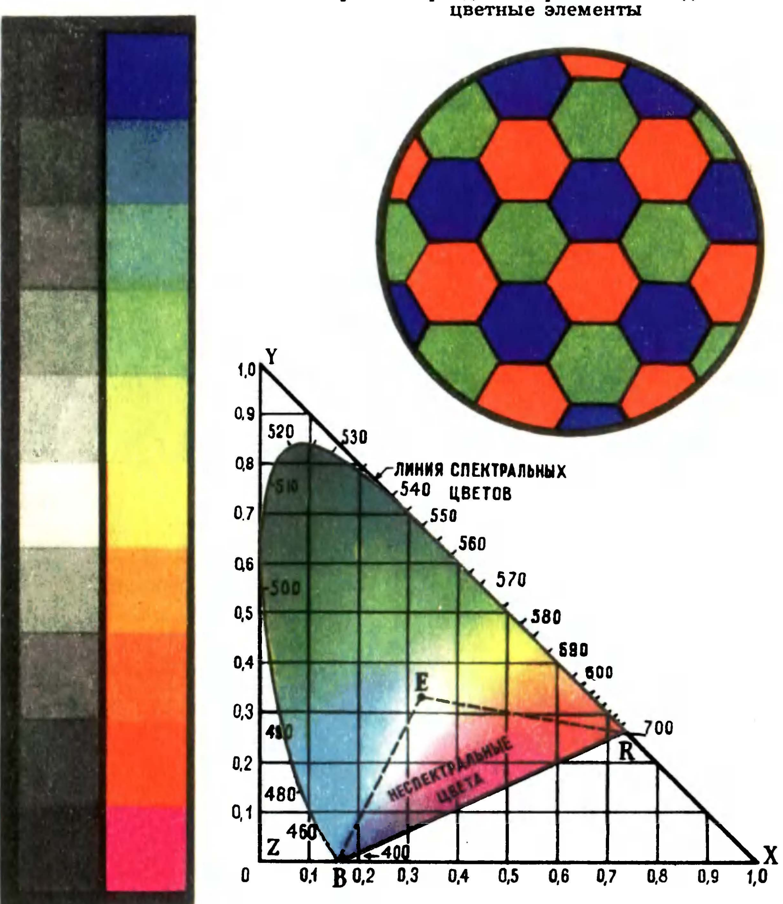


Рис. 17. Цветовой график колориметрической системы XYZ.

Рис. 10. Цветные поля с одинаковой интенсивностью отраженного света и эквивалентные по яркости серые поля.

а)



б)

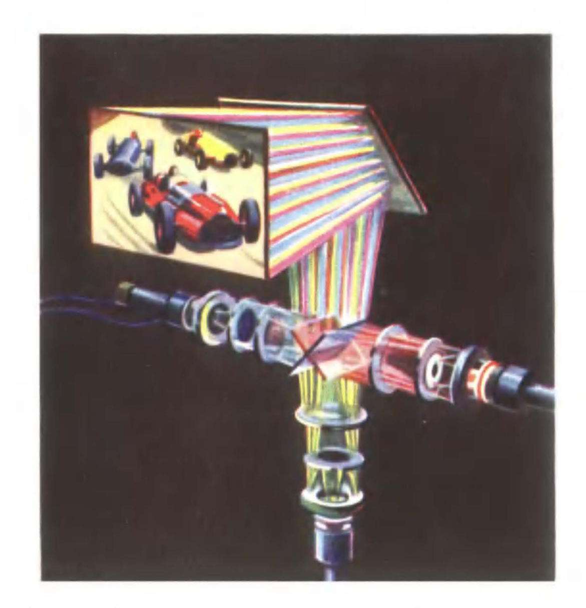


Рис. 21. Оконечные оптические устройства цветных телевизионных приемников.

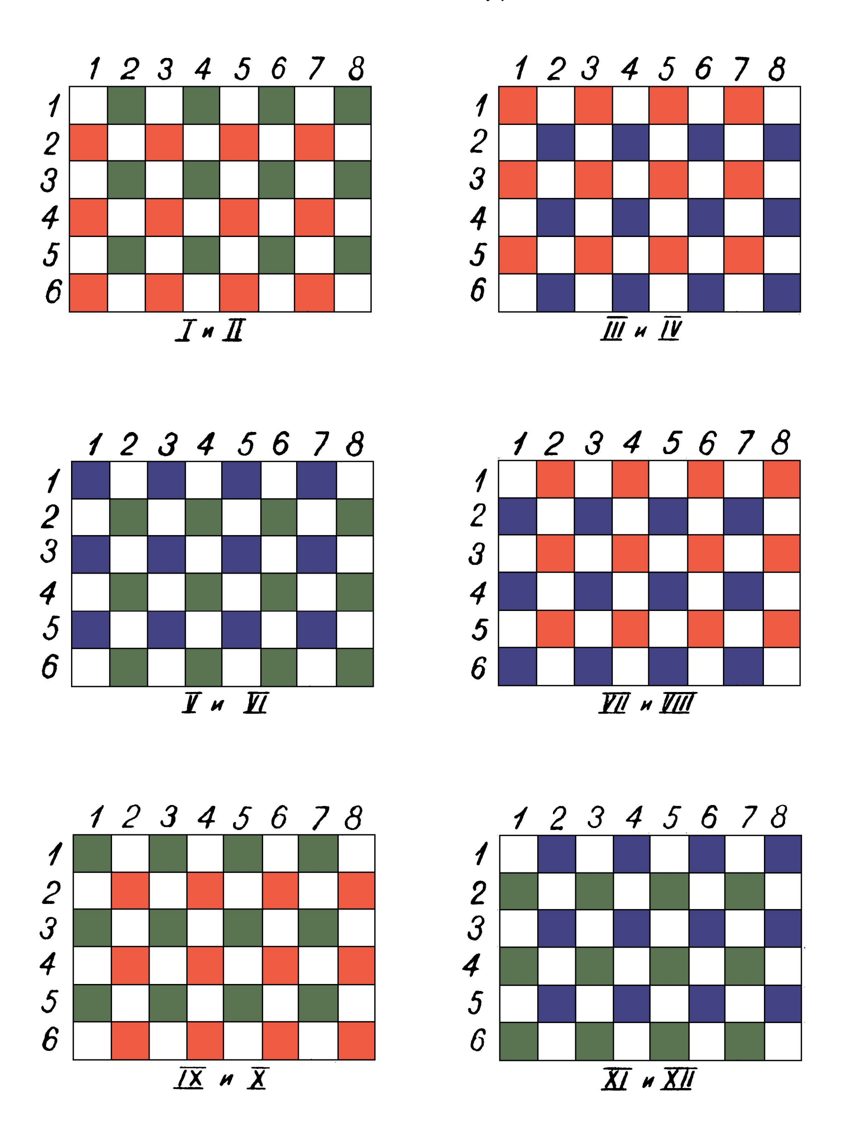


Рис. 45. Поля при чересточечном и чересстрочном разложении в трех цветах.

[redacted]

3 р. 50 к.